

République Algérienne démocratique et populaire

Université Abdelhamid Ibn-Badis
de Mostaganem
Faculté des Sciences de la Nature
et de la Vie



جامعة عبد الحميد بن باديس
مستغانم
كلية علوم الطبيعة والحياة

Département des Sciences Agronomique
Mémoire de fin d'études

Présenté par :

AISSAOUI Nihed
FETTOUCH Imen

Pour l'obtention du diplôme de
MASTER EN AGRONOMIE
Spécialité : Protection des végétaux

Thème

Evaluation de l'éventuel effet antifongique de deux nanoparticules (ZnO et Fe₃O₄) vis à vis de *Fusarium oxysporum*, agent du flétrissement de la tomate, *Solanum lycopersicum* L.

DEVANT LE JURY

Présidente :	Mme BOUALEM M.	Pr	Université de Mostaganem
Examinatrice :	Mme BERGHEUL S.	MCA	Université de Mostaganem
Encadreur :	Mme SAIAH F.	MCB	Université de Mostaganem
Co-encadreur :	Mme BELHADJI K.A.	MCA	Université de Mostaganem

Thème réalisé au laboratoire pédagogique de Protection des végétaux
Année universitaire :2025/20

Remerciements

Avant tout, nous remercions **Allah**, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à nos encadrantes, **Madame SAIAH F.**, et **Madame BELHADJ K.A.**, pour leur accompagnement, leurs précieux conseils et leur soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à **Dr MAHIOUT D.** et à **Dr BADAoui M.I.**, en reconnaissance de leur aide précieuse, de leurs orientations avisées et de leur soutien constant, qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous remercions chaleureusement **Madame BOUALEM M.**, pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de présider le jury de soutenance, ainsi que **Madame BERGHEUL S.** pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et de l'enrichir par ses remarques.

Enfin, nous adressons notre profonde reconnaissance à nos familles, à nos amis ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont soutenus et encouragés, de près ou de loin, tout au long de notre parcours.

À toutes ces personnes, nous exprimons nos plus sincères remerciements

Dédicace
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

À Allah

Source de toute force, de patience et d'espérance. Merci pour Tes innombrables bienfaits, pour le courage accordé dans les moments difficiles et pour m'avoir guidée jusqu'à l'aboutissement de ce travail. Alhamdulillah pour chaque épreuve et chaque réussite

À la jeune fille que j'étais

Celle qui a osé rêver malgré les obstacles, qui n'a jamais abandonné malgré les doutes et la fatigue. Ce travail est la preuve que la persévérance transforme les rêves en réalité

À ma mère

Mon cœur, ma tendresse et ma source infinie d'amour. Aucun mot ne pourra exprimer ma gratitude pour tous les sacrifices consentis, tes prières, ton soutien indéfectible et ton affection sans limites. Que Dieu te protège et te récompense pour tout ce que tu as fait pour moi

À mon père

Mon premier soutien, mon modèle et mon refuge. Merci pour tes sacrifices, tes conseils précieux, ta confiance inébranlable et ton amour silencieux. Ta présence à mes côtés a toujours été ma plus grande force.

À mon frère et mes sœurs : HAMZA, NOUR EL HOUDA, AMINA, ANFEL

Merci pour votre affection, vos encouragements et tous les moments partagés. Votre présence a rendu ce long parcours plus léger et plus beau.

À ma chère binôme AISSAOUI NIHAD

Merci pour notre collaboration, notre patience, notre persévérance et tous les efforts fournis ensemble tout au long de ce parcours universitaire. Je vous souhaite un avenir rempli de réussite, de bonheur et de succès.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreuse, Mme SAIAH Farida

Pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire. Qu'elle trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ma réussite, par un mot, un geste, un conseil ou une prière, je dédie ce travail avec toute ma reconnaissance et mon profond respect.

FETTOUCH IMEN

Dédicace
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

C'est avec une profonde gratitude que je dédie ce travail de fin d'études à toutes les personnes qui ont accompagné mon parcours par leur présence, leur affection et leur soutien.

À mes très chers parents,

Pour votre amour inconditionnel, votre patience infinie et tous les sacrifices consentis pour mon bonheur et ma réussite. Vos encouragements constants, votre confiance et vos prières ont toujours été ma plus grande force. Ce travail est le reflet de tout ce que vous m'avez offert avec générosité et tendresse.

À mon frère Aymen et à mon petit frère Fethallah,

Pour votre affection sincère, votre présence rassurante et tous ces moments de joie qui ont illuminé mon quotidien. Votre soutien discret mais précieux m'a accompagnée tout au long de cette aventure.

À ma chère amie Manel,

Merci pour ton amitié sincère, ton écoute attentive et ton soutien constant. Ta présence à mes côtés a rendu ce chemin plus doux et plus agréable.

À mon binôme et ma chère amie Imen,

Tu as été bien plus qu'une simple partenaire de travail. Merci pour ton sérieux, ta patience, ton écoute et tous les efforts que nous avons partagés ensemble. Cette aventure n'aurait pas eu la même valeur sans notre collaboration et les souvenirs que nous avons construits au fil de ce parcours.

Enfin, ma reconnaissance la plus sincère va à mon encadrante de mémoire, **Madame Saiah Farida**, Pour sa disponibilité, ses précieux conseils, son accompagnement constant et sa confiance, qui ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail. Votre rigueur scientifique, votre professionnalisme et vos qualités humaines ont été pour moi une véritable source d'inspiration tout au long de cette expérience.

À l'ensemble de mes enseignants en Protection des Végétaux, pour la richesse de votre savoir, transmis avec passion, dévouement et bienveillance. Merci pour les connaissances acquises, les conseils prodigués et les valeurs que vous nous avez inculquées tout au long de notre formation.

À tous ceux qui ont cru en moi, m'ont encouragée et soutenue de près ou de loin, Recevez l'expression de ma sincère reconnaissance.

À chacun de vous, merci

Nihed

Résumé

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est une culture d'une grande importance économique, mais elle est fortement affectée par la fusariose vasculaire, l'une des maladies les plus graves de cette espèce. Dans le cadre de la recherche d'alternatives de lutte, cette étude a été menée afin d'évaluer l'activité antifongique de nanoparticules de ZnO et de Fe₃O₄ biosynthétisées vis-à-vis de deux isolats de *Fusarium oxysporum*. Des essais in vitro et in vivo ont été réalisés en utilisant différentes concentrations des nanoparticules.

L'étude in vitro a montré que l'efficacité des traitements varie selon le type de nanoparticule, l'isolat fongique et la concentration, avec un effet maximal systématiquement observé à la concentration de 100%. L'isolat *F. oxysporum* 1 s'est révélé le plus sensible in vitro, notamment sous l'effet des nanoparticules de ZnO, où la vitesse de croissance a été limitée à 2,4 cm à 100%, contre 4,2 cm pour le témoin. Sous l'effet des nanoparticules de Fe₃O₄, il a également présenté une activité antifongique marquée, avec un taux d'inhibition maximal de 64,29%. En revanche, *F. oxysporum* 2 s'est montré moins sensible aux nanoparticules, qui ont exercé un effet inhibiteur plus faible.

Les deux types de nanoparticules ont réduit significativement la production de conidies des deux isolats de *F. oxysporum*.

L'étude in vivo a démontré qu'à la concentration de 100%, les nanoparticules de Fe₃O₄ ont offert une protection durable et un effet préventif supérieur à celui de *Trichoderma* sp., en freinant efficacement l'évolution de la fusariose pendant trois semaines. À l'inverse, les nanoparticules de ZnO ont perdu leur efficacité au cours du temps, tandis que les faibles concentrations (25% et 12,5%) se sont révélées insuffisantes pour protéger les plants de tomate.

Mots-clés : tomate, *Fusarium oxysporum*, nanoparticules, ZnO, Fe₃O₄, activité antifongique.

Abstract:

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is a crop of major economic importance, but it is severely affected by vascular fusarium wilt, one of the most serious diseases of this species. In the search for alternative control strategies, this study was conducted to evaluate the antifungal activity of biosynthesized ZnO and Fe₃O₄ nanoparticles against two *Fusarium oxysporum* isolates. In vitro and in vivo assays were carried out using different nanoparticle concentrations.

The in vitro study showed that treatment efficacy varied according to the type of nanoparticle, the fungal isolate, and the concentration, with the maximum effect consistently observed at 100%. *F. oxysporum* isolate 1 proved to be the most sensitive in vitro, particularly under the effect of ZnO nanoparticles, where growth was limited to 2.4 cm at 100%, compared with 4.2 cm for the control. Under the effect of Fe₃O₄ nanoparticles, it also exhibited marked antifungal activity, with a maximum inhibition rate of 64.29%. In contrast, *F. oxysporum* isolate 2 was less sensitive to the nanoparticles, which showed a weaker inhibitory effect.

Both types of nanoparticles significantly reduced conidial production in the two *F. oxysporum* isolates.

The in vivo study demonstrated that at 100% concentration, Fe₃O₄ nanoparticles provided durable protection and a stronger preventive effect than *Trichoderma* sp., effectively slowing down fusarium wilt development over three weeks. By contrast, ZnO nanoparticles lost their effectiveness over time, while the lower concentrations (25% and 12.5%) were insufficient to protect tomato plants.

Keywords: tomato, *Fusarium oxysporum*, nanoparticles, ZnO, Fe₃O₄, antifungal activity.

ملخص

الطماطم (*Solanum lycopersicum* L.) محصول ذو أهمية اقتصادية كبيرة، إلا أنها تتأثر بشدة بذبول الفيوزاريوم الوعائي، وهو أحد أخطر الأمراض التي تصيب هذا المحصول. وفي إطار البحث عن بدائل للمكافحة، أنجزت هذه الدراسة لتقييم النشاط المضاد للفطريات لجسيمات ZnO و Fe₃O₄ النانوية المُخلَّقة حيويًا ضد عزلين من *Fusarium oxysporum*. وقد أُجريت اختبارات *in vivo* و *in vitro* باستعمال تراكيز مختلفة من الجسيمات النانوية.

أظهرت الدراسة *in vitro* أن فعالية المعاملات تختلف باختلاف نوع الجسيمات النانوية، والعزلة الفطرية، والتركيز، مع تسجيل أكبر تأثير عند تركيز 100%. وقد تبين أن العزلة الأولى من *F. oxysporum* كانت الأكثر حساسية في الاختبارات *in vitro*، خصوصًا تحت تأثير جسيمات ZnO النانوية، حيث حُدِّد نموها إلى 2.4 سم عند تركيز 100%، مقارنة بـ 4.2 سم في الشاهد. كما أظهرت تحت تأثير جسيمات Fe₃O₄ النانوية نشاطًا مضادًا للفطريات ملحوظًا، بنسبة تثبيط قصوى بلغت 64.29%. في المقابل، كانت العزلة الثانية من *F. oxysporum* أقل حساسية للجسيمات النانوية، حيث كان تأثيرها المثبط أضعف.

وقد أدّى كلا النوعين من الجسيمات النانوية إلى خفض معنوي في إنتاج الكونيديات لدى العزلتين من *F. oxysporum*.

أما الدراسة *in vivo* فقد بينت أنه عند تركيز 100% وفّرت جسيمات Fe₃O₄ النانوية حماية طويلة الأمد وتأثيرًا وقائيًا أفضل من *Trichoderma* sp.، إذ نجحت في الحد من تطور ذبول الفيوزاريوم خلال ثلاثة أسابيع. وعلى النقيض من ذلك، فقدت جسيمات ZnO النانوية فعاليتها مع مرور الوقت، في حين أن التراكيز المنخفضة (25% و 12.5%) كانت غير كافية لحماية نباتات الطماطم.

الكلمات المفتاحية: الطماطم، *Fusarium oxysporum*، الجسيمات النانوية، ZnO، Fe₃O₄، النشاط المضاد للفطريات.

Table des matières

Table des matières	
Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Introduction	1
Chapitre 1 : Généralités sur la tomate.....	3
1.1. Origine et historique	3
1.2- Description botanique	3
1.3- Classification botanique	6
1.5- Cycle de développement.....	8
1.6-La tomate dans le monde	9
1.6.1-Production et commerce mondiaux de la tomate.....	9
1.6.2- En Algérie.....	9
1.6.3- A Mostaganem	10
1.7-Les exigences édapho-climatiques de la tomate	10
1.7.1- Les exigences climatiques	10
1.7.2. Exigences édaphiques	11
1.7.3- Exigences nutritionnelles	12
1.8-. Principales maladies et ravageur de la tomate.....	13
Chapitre II : Généralité sur le <i>Fusarium</i> sp.	17
2.2-Classification du <i>Fusarium</i>	18
2.3-Identification de <i>Fusarium oxysporum</i>	18
2.4-Cycle de vie de <i>Fusarium oxysporum</i>	20
2.5-Symptôme.....	21
2.5.1-Le flétrissement fusarien.....	22
2.5.2-La pourriture racinaire	23
2.5.3-Les facteurs influençant la maladie	25
2.5.4-Les races de <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>lycopersici</i>	25
2.6-Les moyens de lutte.....	26
Chapitre III : Généralité sur les nanoparticules (NPs).....	28
3.1. Nanoparticules biologiques	28
3.2- Rôle des nano-engrais dans le flux des nutriments	29
3.3- Mécanisme d'action toxique des nanoparticules (NPs)	30
3.4. Nanoparticules spécifiques et leurs rôles en agriculture.....	31
3.5. Perspectives d'avenir des nano biofertilisants.....	36
Chapitre I : Matériel et Méthode	37
1.1. Objectif	37
1.2. Matériel biologique.....	37
1.2.1-Matériel fongique	37
1.2.2-. <i>Trichoderma</i> sp.	37
1.2.3- Nanoparticule	37
1.3. Matériel végétal.....	38
1.4-Méthodes utilisées.....	38
1.4.2- Isolement de l'agent antagonisme à partir du sol.....	38
1.4.3- Identification des champignons isolés.....	40
1.4.4- Technique de culture monospores.....	40
1.4.5 - Évaluation « <i>in vitro</i> » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO et Fe ₃ O ₄ vis-à-vis de deux isolats de <i>Fusarium oxysporum</i>	41
1.4.6- Évaluation « <i>in vivo</i> » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO et Fe ₃ O ₄ vis-à-vis de deux isolats de <i>Fusarium oxysporum</i>	44
Chapitre II : Résultat et interprétation.....	50

2.1-Identification macroscopique et microscopique des isolats.....	50
2.2-Evaluation « <i>in vitro</i> » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO et Fe ₃ O ₄ vis-à-vis de la croissance des deux isolats de <i>Fusarium oxysporum</i>	51
2.2.1-Evaluation « <i>in vitro</i> » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO sur la croissance de <i>F. oxysporum</i>	51
2.2.2-Evaluation « <i>in vitro</i> » de l'activité antifongique des nanoparticules de Fe ₂ O ₃ sur la croissance de <i>F. oxysporum</i>	55
2.3- Evaluation « <i>in vitro</i> » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO sur de la sporulation de <i>Fusarium oxysporum</i> 1.....	57
2.3.1-Evaluation « <i>in vitro</i> » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO sur de la sporulation de <i>Fusarium oxysporum</i> 2.....	57
2.3.2-Évaluation « <i>in vitro</i> » de l'activité antifongique des nanoparticules de Fe ₃ O ₄ sur la sporulation de <i>Fusarium oxysporum</i>	63.
2.3.2.1-Évaluation « <i>in vitro</i> » de l'activité antifongique des nanoparticules de Fe ₃ O ₄ sur la sporulation de <i>Fusarium oxysporum</i> 1.....	63
2.3.2.2-Évaluation « <i>in vitro</i> » de l'activité antifongique des nanoparticules de Fe ₃ O ₄ sur la sporulation de <i>Fusarium oxysporum</i> 2.....	64
2.3- Evaluation « <i>in vivo</i> » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO et Fe ₃ O ₄ vis-à-vis des deux isolats de <i>Fusarium oxysporum</i>	65
Chapitre III: Discussion.....	69
Conclusion générale	72
Références bibliographiques	

Liste des Figures

Figure 1 : Premières images de tomate publiées	3
Figure 2 : Les graines de tomate	4
Figure 3 : La tige de tomate	4
Figure 4 : Les feuilles de tomate	5
Figure 5 : Les fleurs de tomate	5
Figure 6 : Fruit de tomate.....	5
Figure 7 : Cycle de vie de la tomate.....	9
Figure 8 : Diffusion de la tomate dans le monde	9
Figure 9 : Caractéristiques du <i>F. oxysporum</i>	20
Figure 10 : Cycle de vie de <i>F oxysporum</i>	21
Figure 11 : Symptômes externe de flétrissure fusarienne sur tomate.....	22
Figure 12 : Brunissement des vaisseaux conducteurs d'un plant de tomate infecté par <i>F. oxysporum</i>	23
Figure 13 : Pourriture racinaire sur plants de tomate infecté par <i>Fusarium oxysporum</i>	24
Figure 14 : Pourriture racinaire sur plant de tomate infecté par <i>Fusarium oxysporum</i>	25
Figure 15 : L'application des nanoparticules et leur mouvement à l'intérieur des plantes.....	29
Figure 16 : Mécanisme d'action des nanofertilisants.....	31
Figure 17 : Nanoparticule de Zn et Fe utilisés pour nos différents tests.....	38
Figure 18 : Emballage des semences de la variété Redy hybride F1 de la société Global Seeds.....	38
Figure 19 : Les différentes étapes de l'isolement.....	39
Figure 20 : Etapes de la culture monospores des isolats fongiques	41
Figure 21 : Les diffentes etapes du test de l'évaluation in vitro de l'effet antifongique.....	42
Figure 22 : La serre expérimentale au niveau du site 3, de l'Université de Mostaganem.....	44
Figure23 : Sacs ayant servi à la stérilisation du terreau.....	44
Figure 24 : Pots après leur remplissage avec du terreau stérile sont couvert en attendant la plantation des plant.....	45
Figure 25 : Mise en pots des plantules de tomates.....	45
Figure26 : Etapes de préparation de l'inoculum des deux isolats de <i>F. oxysporum</i>	46
Figure27 : Préparation de la suspension des nanoparticules.....	47
Figure28 : Inoculation par irrigation des isolats de <i>Fusarium oxysporum</i> champignons.....	47
Figure29 : Echelle de notation de la sévérité des symptômes de la fusariose sur les plants de tomate.....	49
Figure 30 : Aspect macroscopique de <i>Fusarium oxysporum</i>	50
Figure 31 : Aspect microscopique de <i>Fusarium sp</i>	51
Figure 32 : Effet des différentes concentrations des nanoparticule de Fe ₃ O ₄ (en bas) et ZnO (en haut) sur la croissance de <i>F. oxysporum</i> 1	51
Figure 33 : Effet des nanoparticules de ZnO sur la croissance mycélienne de <i>F. oxysporum</i> 1.....	53
Figure 34 : Effet des nanoparticules de ZnO sur la vitesse de croissance mycélienne de <i>Fusarium oxysporum</i> 1.....	53
Figure 35 : Effet des nanoparticules de ZnO sur taux d'inhibition de la vitesse de croissance de <i>Fusarium oxysporum</i> 1.....	54
Figure 36 : Effet des différentes concentrations des nanoparticule de Fe ₃ O ₄ (en bas) et ZnO (en haut) sur la croissance de <i>F. oxysporum</i> 1.....	55
Figure 37 : Effet des nanoparticules de ZnO sur la croissance mycélienne de <i>F. oxysporum</i> 2.....	55
Figure 38 : Effet des nanoparticules de ZnO sur la vitesse de croissance mycélienne de <i>F.oxysporum</i> 2.....	56
Figure 39 : Effet des nanoparticules de ZnO sur le taux d'inhibition de la croissance mycélienne du <i>F. oxysporum</i> 2.....	57
Figure 40 : Effet des nanoparticules de Fe ₃ O ₄ sur la croissance mycélienne de <i>F. oxysporum</i> 1.....	57
Figure 41 : Effet des nanoparticules de Fe ₃ O ₄ sur la vitesse de croissance mycélienne de <i>F.oxysporum</i> 1.....	59
Figure 42 : Effet des nanoparticules de Fe ₃ O ₄ sur le taux d'inhibition de la croissance mycélienne du <i>F. oxysporum</i> 1.....	59
Figure 43 : Effet des nanoparticules de Fe ₃ O ₄ sur la croissance mycélienne de <i>F. oxysporum</i> 2.....	59

Figure 44 : Effet des nanoparticules de Fe ₃ O ₄ sur la vitesse de croissance mycélienne de <i>F. oxysporum</i> 2.....	60
Figure 45 : Effet des nanoparticules de Fe ₃ O ₄ sur le taux d'inhibition de la croissance mycélienne du <i>F. oxysporum</i> 2.....	61
Figure 46 : Effet des différentes doses des nanoparticules de ZnO sur la sporulation	62
Figure 47 : Effet des différentes doses des nanoparticules ZnO sur la sporulation 2	63
Figure 48 : Effet des différentes doses des nanoparticules Fe ₃ O ₄ sur la sporulation de <i>F. oxysporum</i> 1.....	64
Figure 49 : Effet des différentes doses des nanoparticules Fe ₃ O ₄ sur la sporulation de <i>F. oxysporum</i> 2.....	64
Figure 50 : Effet des différentes doses des nanoparticules (Fe ₃ O ₄ et ZnO) et <i>Trichoderma</i> sp. sur la sévérité de la fusariose après la première semaine de traitements.....	65
Figure 51 : Effet des différentes doses des nanoparticules (Fe ₃ O ₄ et ZnO) et <i>Trichoderma</i> sp, sur la sévérité de la fusariose après la deuxième semaine de traitements.....	66
Figure 52 : Effet des différentes doses des nanoparticules (Fe ₃ O ₄ et ZnO) et <i>Trichoderma</i> sp, sur la sévérité de la fusariose après la troisième semaine de traitements.....	67.
Figure 53 : quelques symptômes de <i>Fusarium oxysporum</i> sur les plants de tomate traités au cours du tests « in vivo ».....	69

Liste des tableaux

Tableau 1 : La valeur nutritionnelle moyenne pour 100 g de tomate crue.....	7
Tableau 2 : superficies et production de tomate dans la région de Mostaganem.....	10
Tableau3 : les maladies bactériennes de la tomate.....	13
Tableau 4 : les maladies virales de la tomate.....	14
Tableau 5 : les ravageurs de la tomate.....	15.
Tableau 6 : les principales maladies fongiques de la tomate.....	16
Tableau7 : Niveau de protection apportée par les différents traitements appliquées la troisième semaine.....	67

Liste des abréviations

PDA : Potato Dextrose Agar

FOS : *Fusarium oxysporum*

DSA : Direction des Services Agricoles

In vitro : Expérience réalisés ou laboratoire

In vivo : Expérience réalisée sur organisme vivant

NPs : Nanoparticules

Introduction

Introduction :

La tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fait partie de la grande famille des solanacées, aux côtés de la pomme de terre, de l'aubergine, du poivron et du piment. Elle est considérée comme deuxième ressource alimentaire mondiale après les céréales, que ce soit dans la production ou la consommation (TRICHOPOULOU et LAGIO, 1997). Elle est adaptée à des conditions de culture très variées et destinée à la consommation en frais ou à la transformation industrielle (Causse et al., 2000). LEMOINES (1999) rapporte qu'il en existe plus de 700 variétés.

Les pays méditerranéens en sont consommateurs en toutes saisons (BENKAMOUN, 2009). En Algérie, elle est beaucoup plus consommée sous sa forme industrielle, BACI (1993) estime que sa consommation annuelle sous forme concentrée avoisinerait les 04 Kg par an et par habitant. La plante est cultivée sous serre et en plein champ, sur une superficie d'environ 3 millions d'hectares, ce qui représente près du tiers des surfaces mondiales consacrées aux légumes (ANONYME1, 2010).

Compte tenu de son importance économique, elle fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques et elle est considérée comme une plante modèle en génétique. Elle a donné naissance aux hybrides commercialisés de façon éphémère, aux Etats Unis dans les années 1990 (ANONYME2, 2010).

Un tiers de la production agricole mondiale est détruit d'une année à l'autre à cause de différents agents pathogènes, tels que les champignons et les insectes, qui causent d'énormes dégâts sur les cultures depuis le semis jusqu'à leur commercialisation (GUENAOUI, 2008).

Dans le bassin méditerranéen, la tomate est atteinte par la fusariose vasculaire. Cette maladie, connue depuis longtemps comme une pathologie principale des cultures de tomate, peut se manifester soit au premier stade de la germination, soit plus tardivement dans le développement de la plante (MESSIAIEN, 1981).

Cette maladie se déclare subitement et provoque un flétrissement brutal chez les plantes atteintes. L'agent responsable de cette affection est un champignon appartenant à l'espèce *Fusarium oxysporum*. Cet agent n'est pas un parasite obligatoire ; il est capable de se conserver et de se multiplier dans le sol même en l'absence de la plante hôte (HENNI, 1998).

L'étude de cette maladie et la mise au point de moyens de lutte adaptés constituent une préoccupation importante pour un bon nombre de chercheurs.

L'espèce *Fusarium oxysporum* comporte un ensemble de forme identique morphologiquement mais présentant des spécificités parasitaires parfois très étroites, dénommés pour cette raison formes spécialisées (CORRELL et al., 1987 ; BOISSON, 1991).

Deux formes spéciales différentes sont spécifiques à la tomate : *F. oxysporum f.sp. lycopersici* (Fol) qui provoque des mycoses vasculaires et *F. oxysporum f.sp. radialis-lycopersici* (Forl) qui engendre des pourritures racinaires. Dans les deux cas, la fusariose se traduit par un flétrissement de la plante pouvant aller jusqu'au dessèchement des feuilles (Laterrot et *al.*, 1988).

Il y a quelques années, le seul moyen de lutte contre la fusariose était d'arroser les cultures avec du benomyl (bénomyl) ou du bromure de méthyle, mais ces produits sont dangereux, peu efficaces et ont été interdits par la suite. Parallèlement à cette lutte chimique, les producteurs utilisent également des variétés de tomates résistantes, essentiellement à la forme spéciale *lycopersici*. Néanmoins, certaines variétés sensibles sont toujours cultivées dans de nombreux pays, notamment en Afrique du Nord, pour des raisons économiques et pour leurs aptitudes à s'adapter aux conditions climatiques tout en offrant des fruits de bonne qualité.

Dans les pays du Maghreb et même dans de nombreux pays du bassin méditerranéen où la culture de la tomate a une place économique très importante, les fusarioses de la tomate dues aux deux formes spéciales (Fol et Forl) présentent une sérieuse menace.

Dans ce contexte, la présente étude est menée afin d'évaluer l'efficacité antifongique « *in vitro* » et « *in vivo* » de deux nanoparticules d'origine botanique (ZnO et Fe_2O_3), vis-à-vis de deux isolats de *Fusarium oxysporum* à partir d'une culture de tomate affectée de fusariose.

Chapitre I :

Données bibliographiques

Chapitre 1 : Généralités sur la tomate

1.1. Origine et historique :

La tomate (*Lycopersicon esculentum*), originaire d'Amérique du Sud, fut domestiquée au Mexique. En 1544, elle fut introduite en Espagne et en Italie, puis dans les autres pays européens. Elle s'est ensuite propagée en Asie du Sud et de l'Est, en Afrique et au Moyen-Orient (SHANKARA et *al.*, 2005).

En 1905, la tomate fut introduite en Algérie par les Espagnols dans la région de l'Ouest (Oran), puis elle s'est étendue vers le Centre (LATIGUI, 1984).

Étymologiquement, le mot « tomate » est une déformation du mot inca « tomatl ». Le terme « *Lycopersicum* » signifie en latin « pomme de loup » (appellation peu alléchante), à laquelle on a ajouté au XVIII^e siècle l'adjectif « *esculentum* » en raison des propriétés gustatives de ce légume-fruit (NAIKA et *al.*, 2005).



Figure 1 : Premières images de tomate publiées

(A) Image publiée par Dodoens en 1553. Tiré de Daunay et *al.* (2007) /

(B) Planche de tomate dessinée par Mattioli en 1590, édition
Dioscorides, Almage.

1.2- Description botanique :

La tomate est une plante maraichère, herbacée, annuelle et aromatique appartenant à la famille des Solanaceae. Sa taille varie entre 40 cm à plus de 5 mètres selon les variétés et le mode de culture (BERNARD et *al.*, 2009).

- **Système racinaire** : Il est très développé et pivotant avec de nombreuses racines, la plupart des racines se situent à une profondeur de 30 à 40 cm, dans le cas où le semis est effectué directement en place, la racine centrale se développe relativement vite, elle peut atteindre une profondeur de 100 à 150 cm (KOLEV, 1976).

- **La graine :** Dans chaque fruit, les graines sont petites, nombreuses (environ 300 à 350 graines/g), Elles sont de 3 à 5 mm de long et 2 à 4 mm de large 1000 graines pèsent approximativement 2,5 à 3,5 g (SHANKARA et *al.* 2005). Selon Rey (1965), les semences peuvent garder leur faculté germinative pendant 4 à 5 ans dans les conditions normales.

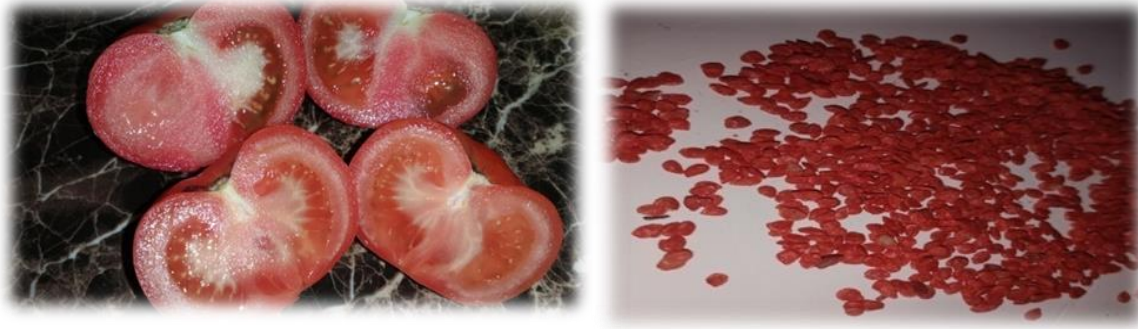


Figure 2 : Les graines de tomate (originale 2026)

- **La tige :** Elle est anguleuse, épaisse aux entre-nœuds, pubescente, de consistance herbacée en début de croissance (CHAUX et FOURY, 1995).



Figure 3 : La tige de tomate (original 2026)

- **Les feuilles :** elles sont disposées en spirale et ont 15 à 50 cm de largeur. Elles sont alternées sur la tige (Raemaekers, 2001) (Figure 4). Les folioles sont ovales à oblongues, couvertes de poils glandulaires. Le pétiole mesure entre 3 et 6 cm.



Figure 4 : Les feuilles de tomate (Originale, 2026)

- **Les fleurs :** Elles sont petites, jaunes, en formes d'étoile (Polese, 2007). Elles sont groupées en inflorescences simples ou ramifiées, leur nombre est variable allant de 5 à 12 (Bernard et *al.*, 2009).



Figure 5 : Les fleurs de tomate (Original, 2026)

- **Les fruits :** Ce sont des baies charnues, au placenta très développé, d'une forme globulaire avec un diamètre variant entre 2 à 15 cm. A maturité, leur couleur vire du jaune au rouge en passant par l'orange (Alaoui, 2009). Ils peuvent être ronds et réguliers ou côtelés (Shankara et *al.*, 2005).



Figure 6 : Fruit de tomate (Var : Fournaise) (Original, 2026).

1.3- Classification botanique :

La classification de la tomate se base essentiellement sur le type de croissance, la nature génétique, la forme et la grosseur des fruits, le nombre moyen de loges par fruits, la résistance aux maladies et la qualité commerciale et industrielle de la variété (KOLEV, 1976). C'est une espèce de plante herbacée de la famille des Solanacées. Selon DUPONT et GUIGNARD, (2012) et SPICHIGER et *al.*, (2004) la tomate appartient à la classification suivante :

Règne :	<i>Plantae</i>
Sous règne :	<i>Trachenobionta</i>
Division :	<i>Magnoliopsida</i>
Classe :	<i>Magnoliopsida</i>
Sous classe :	<i>Asteridae</i>
Ordre :	<i>Solanales</i>
Famille :	<i>Solanaceae</i>
Genre :	<i>Solanum</i>
Espèce :	<i>Solanum lycopersicum</i> L.

1.4-Valeur nutritionnelle :

La tomate tient une place importante dans l'alimentation humaine. C'est un aliment diététique, très riche en eau et très pauvre en calories. Elle est riche en éléments minéraux et en vitamines (A, C, E), et ses antioxydants en font un formidable rempart contre les affections (Anonyme, 2009).

Sa consommation contribue à un régime sain et équilibré. Les fruits contiennent des minéraux, vitamines, acides aminés, sucres et fibres alimentaires (tableau 01). Les tomates rouges contiennent du lycopène, un antioxydant qui protège possiblement contre les substances carcinogènes (30 mg dans 200 ml de sauce tomate).

Les tomates se consomment fraîches en salade, cuites dans sauces, soupes, plats de viande ou de poisson. Elles peuvent aussi être transformées en purée, jus et ketchup (NAIKA et al., 2005).

Tableau 01. La valeur nutritionnelle moyenne pour 100 g de tomate crue (Bernardin, 1985) :

	Eléments	Teneur
Matières organiques	Eau	93 g
	Protéines	1 g
	Glucides	4 g
	Lipides	0.3 g
	Fibres	1.2 g
	Cellulose	0.6 g
Vitamines	Vitamine B1	0.09 mg
	Vitamine B3	0.5 mg
	Vitamine C	38 mg
Sels minéraux	Calcium	11 mg
	Chlore	40 mg
	Fer	0.6 mg
	Potassium	280 mg
	Magnésium	10 mg
	Sodium	3 mg
	Phosphore	27 mg
	Soufre	11 mg

En outre, la tomate possède des propriétés médicinales. Voici quelques exemples :

- Un antibiotique naturel (Feuilles) : Chez les Incas d'Amérique du Sud et chez certaines tribus de Nouvelle-Guinée, on utilise les feuilles fraîches pour guérir les plaies infectées.
- Un antifatique (Fruits) : La tomate fraîche ou le jus de tomate accélère la formation du glucose dans le sang et apporte un regain d'énergie naturelle.
- Elle est excellente pour la santé du foie (Fruits) : La tomate contient des traces d'éléments antitoxiques appelés chlorine, qui permet de mieux filtrer les déchets de l'organisme. Le soufre protège le foie contre certains engorgements.
- Elle aide à dissoudre les graisses (Fruits) : La tomate est excellente pour contrer les effets négatifs d'une alimentation trop grasse en aidant le foie à dissoudre les graisses et à les éliminer plus facilement.
- Elle diminue l'hypertension (Fruits) : La tomate, étant riche en potassium, agit positivement sur les reins. Des études cliniques ont démontré qu'un bon fonctionnement rénal permet de diminuer l'hypertension.
- Elle soulage les coups de soleil (Fruits) : Un remède miracle : une tranche de tomate posée sur un coup de soleil pendant 15 minutes enlève l'effet de la brûlure et évite que la peau pèle ou cloque (NAIKA et *al.*, 2005).

1.5- Cycle de développement

a) - Phase de germination :

Les graines commencent à germer entre 6 et 8 jours après le semis lorsque la température du sol se situe entre 20 et 25°C (VAN DER VOSSSEN et *al.*, 2004). La tigelle émerge alors du sol, accompagnée de deux feuilles cotylédonaire simples et opposées. Sous terre, la radicule se développe avec un manchon de poils absorbants clairement visible (GRET, 2002. LECOMPTE & CAUSSE, 2014).

b) -Phase de croissance :

Pendant la phase de croissance, la plante développe davantage ses racines et sa partie aérienne en produisant des paires de feuilles. La radicule s'allonge et prend l'apparence d'un filament blanchâtre, sur lequel apparaissent des racines secondaires. Les deux premières vraies feuilles émergent vers le 11ème jour et ne sont pleinement développées qu'à partir du 20ème jour. Environ un mois après le semis, la plante compte généralement entre 3 et 4 paires de feuilles (GRET, 2002. LECOMPTE & CAUSSE, 2014).

c)- Phase de floraison :

La première inflorescence, apparaît deux mois et demi environ après le semis. Les autres inflorescences vont apparaître au-dessus de la première, entre deux inflorescences, un nombre variable de feuilles. La floraison s'échelonne donc de bas en haut (GRET, 2002 ; LECOMPTE & CAUSSE, 2014).

d)- Phase de fructification et de maturation :

Le processus débute durant la phase de floraison, avec la nouaison des fruits à partir de l'inflorescence de base et se poursuit vers les inflorescences supérieures au fur et à mesure de leur apparition et de la fécondation des fleurs. Les fleurs se développent et grossissent, et une fois leur taille définitive atteinte, elles commencent à perdre leur coloration verte pour devenir jaune, puis rouge de plus en plus intense. Cette phase s'étend sur environ deux mois, soit entre quatre et six mois après le semis.

La durée du cycle végétatif complet de la tomate (Figure 7) est de 4 à 5 mois environ pour les semis directs en pleine terre et de 5 à 6 mois pour les plants repiqués. En contre saison, le cycle végétatif s'allonge et il peut atteindre 7 mois (GRET , 2002)

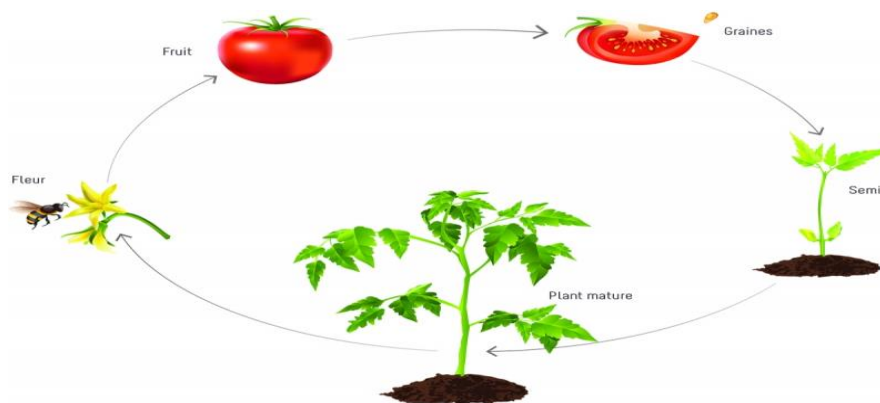


Figure 7 : Cycle de vie de la tomate (LECOMPTE & CAUSSE, 2014).

1.6-La tomate dans le monde

1.6.1-Production et commerce mondiaux de la tomate

La production de tomates s'est répandue dans tous les pays du monde et est en constante augmentation depuis plusieurs années. En 2020, avec une production d'environ 189 millions de tonnes, la tomate est le deuxième légume le plus produit au niveau mondial. Les principaux Pays producteurs sont la Chine, l'Inde, la Turquie et les États-Unis d'Amérique (FAOSTAT, 2023).

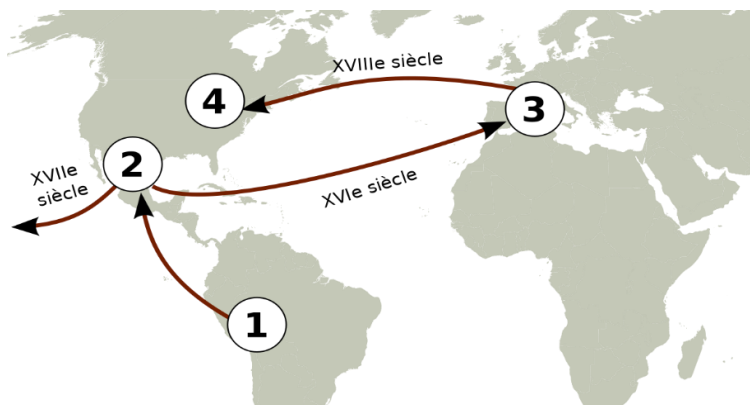


Figure 8 : Diffusion de la tomate dans le monde (GALLAIS et BANNEROT, 1992). (1) Pérou Centre de diversification, (2) Mexique: Premier centre de domestication , (3) Europe: Deuxième centre de domestication, (4) Etats Unis: Troisième centre de domestication.

1.6.2- En Algérie

La production nationale de tomates fraîches a atteint 1,6 million de tonnes en 2020 (FAOSTAT, 2023). Les principales wilayas productrices de tomates fraîches sont :

- **Zone Est** : Elle représente 84% des superficies et regroupe les wilayas de Skikda, El-Taraf, Annaba, Guelma et Jijel. Cette zone est caractérisée par une bonne pluviométrie et possède des sols à forte capacité de rétention d'eau. La culture de tomate se pratique en sec et semi-irrigué, avec une production d'environ 90% de la production nationale.

- **Zone Centre** : Elle représente 12% des superficies et regroupe les wilayas de Blida, Alger, Boumerdes, Bejaia, Chleff, Tipaza et Ain Defla.
- **Zone Ouest** : Cette zone représente 2,7% des superficies de la culture de tomate. Elle regroupe les wilayas de Mostaganem, Relizane, Mascara, Sidi-Bel-Abbès et Tlemcen.
- **Zone Sud** : Elle est représentée par les wilayas d'Adrar et Biskra.

1.6.3- A Mostaganem : Selon les statistiques de la Direction des services agricoles, DSA (2025), la wilaya de Mostaganem est classée parmi les premiers producteurs de tomate de consommation en Algérie.

Tableau 2 : superficies et production de tomate dans la région de Mostaganem (DSA, 2025)

	Tomates industrielle	Tomates en plein champs	Tomates sous serre
Superficies	452 ha	2499 ha	4825 ha
Productions	420360 q	935650 q	338100 q

1.7-Les exigences édapho-climatiques de la tomate :

1.7.1- Les exigences climatiques :

La tomate s'adapte à une grande diversité de conditions climatiques, allant du climat tempéré vers le climat tropical chaud et humide (NAIKA et *al.* 2005).

a) -La température de l'air :

La tomate est une plante des saisons chaudes, elle est exigeante en chaleur pour assurer son cycle végétatif complet. Les températures optimales pour la plupart des variétés sont de 18°C le jour et 15 à 25°C la nuit. Pendant la nuit la fécondation s'arrête à des températures inférieures à 15°C. En dessous de 10°C et en dessus de 38°C, les tissus végétaux sont endommagés (NAIKA et *al.*, 2005). L'équilibre et l'écart entre température diurne et nocturne, semblent nécessaires pour obtenir une bonne croissance et une bonne nouaison de la tomate FURY, 2002). Selon NAIKA et *al.* (2005), durant la croissance la température nocturne a une grande importance, puisque la majeure partie de la croissance quotidienne de la tige (70 à 80%) se produit pratiquement à l'obscurité. La photosynthèse de la tomate est sensible à la température nocturne. Une différence de quelques degrés par rapport à la température appliquée pendant la croissance (14°C), entraîne une réduction d'environ 10% des échanges de la période diurne suivante (LONGUENESSE, 1982).

b) -La lumière :

La tomate est une plante à jour long, elle peut fleurir avec des jours de durée inférieur à 12 heures mais la floraison est moins importante et la production du pollen est difficile. Un éclairage insuffisant provoque un étiolement des plantes, une perte de précocité et une baisse de rendement (REY, 1965).

c)- L'humidité de l'air :

La tomate est très sensible à l'hygrométrie. Il semble qu'une hygrométrie ambiante relativement de 60% à 65% soit la meilleure. L'humidité de l'air joue un rôle important dans la fécondation : si l'humidité est trop élevée, le pollen est difficilement libéré. Par ailleurs, le développement des maladies cryptogamiques est lié à des fortes humidités accompagnées de chaleur (LAUMONIER, 1979).

Selon BENCHAALAL (1983), l'humidité atmosphérique doit être de 76% lors de la germination, 75-80% durant la croissance des plantes, et 70-80% lors du développement des fruits.

d)- Le vent :

La tomate craint les vents surtout au moment de la reprise. Les vents chauds peuvent occasionner des brûlures sur les feuilles et des nécroses sur les fruits, en plus des dégâts causés par les vents forts telle que, la cassure des tiges (GRISSA, 2010)

1.7.2. Exigences édaphiques :**a) - La nature du sol :**

LAUMONIER (1979), signale que la tomate pousse bien sur la plupart des sols, ayant en général une bonne capacité de rétention d'eau, et une bonne aération. Elle préfère les terres limoneuses profondes et bien drainées, légères, meubles, riches en humus, s'échauffant rapidement et plus facilement. La couche superficielle du terrain doit être perméable. Une profondeur de sol de 15 à 20 cm est favorable à la bonne croissance d'une culture saine.

b) - La température du sol :

La température du sol est le premier facteur qui détermine le pourcentage de levée et la vitesse de germination. La vitesse de germination augmente avec la température jusqu'à atteindre une valeur optimale de 25 °C. En revanche, un meilleur pourcentage de levée est obtenu entre 15 °C et 20 °C (REY et COSTES, 1965).

c)- Le pH du sol :

La culture de la tomate tolère une large gamme de pH. Néanmoins, sur des sols à pH basique, certains microéléments (Fe, Mn, Zn, Cu) restent peu disponibles pour la plante. Selon CHAUX et FOURY (1994), le pH toléré varie de 4,5 à 8,5. Le meilleur équilibre nutritionnel est assuré pour des pH compris entre 6 et 7.

d)- L'humidité du sol :

La tomate est exigeante en humidité du sol. L'humidité optimale du sol pour des terres argilo-siliceuses est de 75 à 80% de la capacité au champ, et l'abaissement de l'humidité et de la température du sol crée un déficit hydrique, et par conséquent réduit la photosynthèse et la transpiration (HELLER, 1981).

e) - La salinité du sol :

La tomate est moyennement sensible à la salinité du sol, elle peut supporter des teneurs en sels, allant de 2 à 4g/l. La période pendant laquelle la tomate est plus sensible à la salinité correspond à la germination et au début du développement de la plante (BENTVELSEN, 1980).

f)- L'aération du sol :

Un sol bien aéré détermine un pourcentage élevé de levée des plantules, mais exerce par contre un effet défavorable sur les racines durant la période de croissance végétative. L'aération est indispensable à la maturité des fleurs (CHAUX et FOURY, 1994).

1.7.3- Exigences nutritionnelles :

a) - Exigences hydriques :

Les besoins de tomate en plein champ se situent entre 4000 et 5000 m³/ha. Celles d'un cycle de 90 à 120 jours sont de 400 à 600 m³/ha. L'évolution des besoins en eau de la tomate est fonction de l'environnement, de la plante, mais aussi des stades de développement de celle-ci (BENTVELSEN, 1980).

Une carence en eau à la floraison provoque la chute des bouquets floraux. En phase de fructification l'absence d'eau se traduit par un aplatissement des fruits dont les extrémités se colorent en brun, puis en noir, c'est le « blossom and rot » (REY, 1965).

b) - Exigences en éléments fertilisants :

La quantité d'engrais à fournir varie d'une région à une autre, en fonction notamment de la richesse du sol, du climat et de la technique d'irrigation.

1.8-. Principales maladies et ravageur de la tomate :

Les tableaux 3, 4 et 5 montrent les principales maladies et ravageurs pouvant affecter la tomate

Tableau 3 : les maladies bactériennes de la tomate (SNOUSSI, 2010).

Maladies	Nom scientifique	Symptômes et dégâts	
Chancre bactérien	<i>Clavibacter michiganensis</i>	Flétrissement unilatéral sur feuille, suivi d'un dessèchement total des coupes longitudinales sur tige et pétioles. Sur fruits, se forment des taches blanchâtres.	
Moucheture de la tomate	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>tomato</i>	Sur feuillage : Apparition des taches noires de contour irrégulier entourées d'un halo jaune. Les folioles se dessèchent et tombent.	
Gale bactérien	<i>Xanthomonas compestris</i> pv. <i>Vesicatoria</i>	De nombreuses taches entraînent le dessèchement de folioles et la chute des feuilles, Sur fruit, de petits chancres pustuleux appariassent et prennent un aspect liégeux.	
Flétrissement bactérienne des solanacées	<i>Pseudomonas solanacearum</i>	Flétrissement de type <i>Verticillium</i> ou <i>Fusarium</i> mais suivi de la mort très rapide de la plante.	

Tableau 4 : les maladies virales de la tomate (SNOUSSI, 2010) :

Maladies	Symptômes et dégâts	
Virus de la mosaïque du tabac (TMV)	transmis par la semence et par voie mécanique donnant des plages vert clair et vert foncé sur feuilles jeunes.	
Virus de mosaïque du tomate (ToMV)	Donne des décolorations de feuilles et une stérilisation des inflorescences, également transmis par les semences et par voie mécanique.	
Virus Y de la pomme de terre (PVY)	Donne des nécroses sur feuilles avec dessèchement.	
Tomato chlorosis virus (ToCV); tomato infectious chlorosis virus (TICV), Tomato spotted wilt virus (TSWV) ou maladie bronzée et Tomato yellow leaf curl virus (TYLCV)	Virus provoquant la crispation et le jaunissement sur feuilles.	
Stolbur	Maladie à mycoplasmes, reprise ici dans les maladies à virus car elle a des caractéristiques similaires symptômes de chloroses, prolifération des rameaux, réduction du feuillage, et transmission par les insectes (cicadelles).	

Tableau 5 : les ravageurs de la tomate (ZIRIS, 2011).

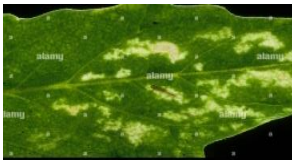
Insectes et ravageurs	Nom scientifique	Symptômes et dégâts	
Nématodes à galles	<i>Meloidogyne incognito</i> <i>Chitwood</i> .et <i>M. arenaria</i> <i>Neal</i>	Galles sur les racines de plantes attaquées, a tige rabougrit, les feuilles jaunissent, puis la plante dépérit.	
Acariens	<i>Tetranychus urticae</i> (KOCHE, 1836) et <i>T. cinnabarinus</i> (BOISDUVAL, 1867).	La face inférieure des folioles devient brune à bronzée sur fruit, la peau présente des craquelures.	
Noctuelles terricoles Noctuelles des fruits	<i>Agrostis segetum</i> (OBERDORFER, 1938) <i>Chloridea armigera</i> (HAMPSON, 1903)	Les jeunes chenilles dévorent le collet et entraînent la mort de la plante.	
Aleurodes	<i>Trialeurodes vaporariorum</i> (WESTWOOD, 1856) et <i>Bemisia tabaci</i> (GENNADIUS, 1889)	Rabougrissement des apex et développement de fumagine sur le miellat produit par les larves, transmission des virus TOCV, TICV et TYLCV.	
Cicadelles	<i>Hialesther obsoletus</i>	Transmission du stolbur, mycoplasmoses.	
Mineuses	<i>Liriomyza trifolii</i> (BURGESS, 1880), <i>L. strigata</i> (MEIGEN, 1830) et <i>Tuta absoluta</i> Meyrick.	Galeries dans le limbe des feuilles âgées par les larves.	
Pucerons	<i>Macrosiphon euphorbiae</i> <i>spersicae</i> (Sulze, 1776).	Enroulement des feuilles, développement de la fumagine et transmission de virus.	

Tableau 06 : les principales maladies fongiques de la tomate (BLANCARD, 2009, NAIKA et

al., 2005).

Maladies	Symptômes	Causées par	
Anthraxnose	Tâches plus ou moins circulaires de 1cm avec un centre noirâtre sur les fruits murs	<i>Colletotrichum Coccodes</i>	
Mildiou	Légères tâches foncées avec un point jaune en leur centre, sont visibles sur les feuilles ayant Sur la face inférieure des feuilles, les tâches sont blanches. Les fruits se couvrent de taches brunes et les feuilles flétrissent.	<i>Phytophthora Infestans</i>	
Verticilliose	Jaunissement en forme de V des feuilles de bas en haut suivi d'un flétrissement avec un léger brunissement des vaisseaux après une coupe	<i>Verticillium Alboatrum</i>	
Alternariose	Tâches rondes et brunes avec des cercles concentriques apparaissant sur les feuilles avec un diamètre de 1,5 cm des grosseurs peuvent apparaître sur les tiges et les feuilles. Les fleurs et les jeunes fruits tombent.	<i>Alternaria solani</i>	
Flétrissure Fusarienne	Jaunissement des feuilles de bas en haut, apparition de racines avortées au bas de la tige, tissus ligneux brun rougeâtre	<i>Fusarium oxysporum f.sp Lycopersici</i>	
Pourriture des Racine est du collet	Brunissement des racines, de leur, cylindre central et des vaisseaux situés au niveau du pivot et de collet.	<i>Fusarium oxysporum fs.p radicis-lycopersci</i>	

Chapitre II : **Généralités sur *Fusarium* sp.**

Chapitre II : Généralité sur le *Fusarium* sp.

Le genre *Fusarium*, décrit pour la première fois par LINKE en 1809, appartient à la famille des Tuberculariacées (GAMS et NIRENBERG, 1989). Ce genre est bien connu pour son rôle important en phytopathologie et regroupe un grand nombre d'espèces (MESSIAEN et *al.*, 1968).

L'espèce *Fusarium oxysporum* se caractérise par une large gamme de plantes hôtes. La plupart des souches pathogènes envahissent le système vasculaire de ces plantes et présentent une spécificité parasitaire, c'est-à-dire que l'espèce ne peut attaquer qu'un hôte déterminé (OZENDA, 1990).

Fusarium oxysporum peut représenter jusqu'à 70% des isollements de *Fusarium* à partir du sol (MESSIAEN et *al.*, 1991). C'est une espèce saprophyte qui joue un rôle très important en pathologie végétale. Elle est responsable de dégâts importants sur de nombreuses cultures, telles que les cultures florales (œillet, cyclamen) ; les cultures maraîchères sous serres (tomate, melon, concombre) ; les palmeraies et bananeraies ; les cultures de coton et de lin (NELSON et *al.*, 1981).

Deux formes spéciales différentes de *F. oxysporum* sont inféodées à la tomate :

- *F. oxysporum* f.sp. *lycopersici* (Fol) → provoque des trachéomycoses
- *F. oxysporum* f.sp. *radicis-lycopersici* (Forl) (LATERROT et *al.*, 1988)

L'infection entraîne un jaunissement des feuilles, d'abord unilatéral puis généralisé, et aboutit au flétrissement, au dessèchement et enfin à la mort de la plante (GINDRAT, 1975). Elle provoque également des symptômes de pourriture racinaire et des maladies qui affectent le système vasculaire des plantes.

2.1-Historique et taxonomie :

La première description du genre *Fusarium* a été faite par LINK en 1809 (NELSON et BOOTH, 1972). Sa délimitation actuelle a été établie par APPEL et WOLLENWEBER en 1910 (CAYLEY, 1921). Depuis cette année, de nombreux travaux ont été consacrés à sa taxonomie (BOOTH, 1971 ; MESSIAEN et CASSINI, 1968 ; NELSON et *al.*, 1983 ; SNYDER et HANSEN, 1940 ; WOLLENWEBER et REINKING, 1935).

L'origine du nom « *Fusarium* » est latine (*fusus*), car il produit des macroconidies fusiformes pluricellulaires.

La taxinomie du genre *Fusarium* a été affectée par des changements de concept d'espèce : WOLLENWEBER et REINKING (1935), ont divisé le genre en 16 sections et 65 espèces, et ont publié la morphologie « Die Fusarien ».

SNYDER et HANSEN (1940), ont réduit toutes les variantes à 10 espèces. Ils ont proposé que toutes les formes de la section « Elegans » appartiennent à une seule espèce : *Fusarium oxysporum*, remettant en question les sections décrites par WOLLENWEBER et REINKING. MESSIAEN et CASSINI (1968), ont gardé essentiellement la classification proposée par SNYDER et HANSEN (1940), tout en proposant des variétés pour certaines espèces. Ils ont publié « La systématique des *Fusarium* ».

Booth (1971), a publié « The genus *Fusarium* » et a décrit 14 espèces.

Gerlach et al. (1982), ont publié « The genus *Fusarium* - A pictorial Atlas », dans lequel ils ont décrit 21 espèces.

Nelson et al. (1983), ont publié un manuel très utilisé pour l'identification des espèces de *Fusarium*, intitulé : « *Fusarium* Species: An Illustrated Manual for Identification ».

Burgess et al. (1988), ont suivi cette étude avec « Laboratory Manual for *Fusarium* Research ».

Et en (2006), LESLIE et SUMMERELL se sont basés sur les critères morphologiques, biologiques et surtout phylogénétiques en utilisant les techniques de biologie moléculaire, et ils ont décrit soixante-dix espèces dans leur publication « The *Fusarium* Laboratory Manual ».

Depuis une dizaine d'années la systématique de *Fusarium*, comme celle des autres groupes des Deutéromycètes, a considérablement évolué en fonction des nouvelles données apportées par les techniques de biologie moléculaire et il est vraisemblable que cette évolution continuera.

2.2-Classification du *Fusarium* :

Règne	Fungi
Division	Ascomycota
Classe	Sordariomycetes
Sous-classe	Hypocreomycetidae
Ordre	Hypocreales
Famille	Nectriaceae
Genre	<i>Fusarium</i>
Espèce	<i>Fusarium oxysporum</i>

2.3-Identification de *Fusarium oxysporum*

Comme pour tous les champignons, la classification des *Fusarium* est basée sur des critères culturels et morphologiques par une observation microscopique : la forme et la taille des macroconidies, la présence ou l'absence de microconidies et de chlamydospores ainsi que leur forme, et la structure des conidiospores (SMAHI, 2007),

En culture, les colonies des isolats de *Fusarium* présentent souvent des nuances roses, jaunes, rouges ou violettes souvent avec une teinte pourpre, et sont clairsemés à abondants. Les champignons du genre *Fusarium* présentent un mycélium septé et incolore (BOOTH, 1985). Le caractère commun aux *Fusarium* est la production de macroconidies pluricellulaires en forme de croissant et autre type des spores asexuées ; des microconidies unicellulaires ou bicellulaires de formes variées, ainsi que des chlamydospores, qui sont des formes de résistance.

a) -Les microconidies

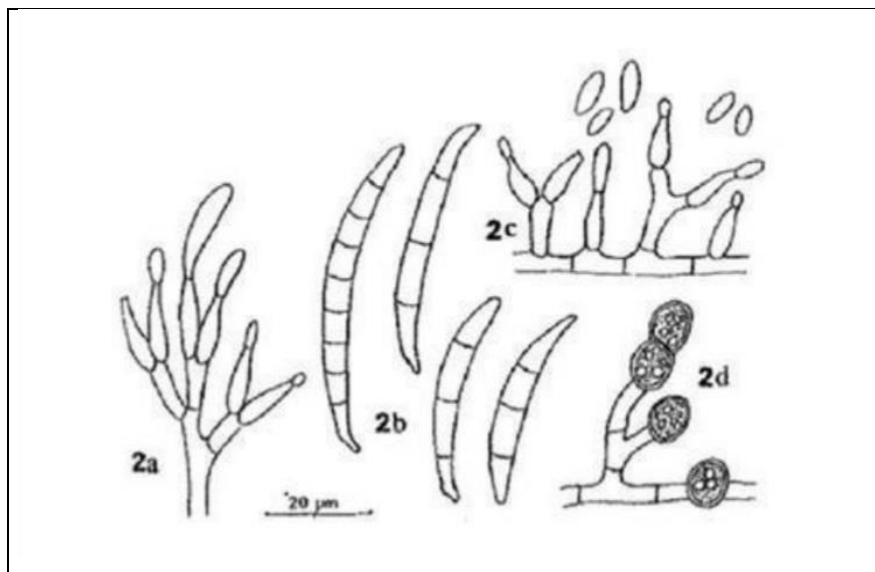
F. oxysporum est caractérisé par la présence abondante de microconidies (TIVOLI, 1988). Elles sont fusiformes à réniformes, présentent 0 à 2 septa, agglomérées en fausses têtes produites par de petits phialides ($5-12 \times 2,2-3,5 \mu\text{m}$). Les observations microscopiques montrent qu'une population de *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* est constituée de plusieurs propagules, dont les microconidies à elles seules constituent plus de 90% de cette population (TELLO-MARQUINA et ALABOUVETTE, 1984).

b)-Les macroconidies

Légèrement arquées, présentant 3 à 4 septa, la cellule basale pédicellée, la cellule apicale en crochet. Elles sont produites par des phialides sur des conidiophores ramifiés ou en sporodochies ($27-46 \times 3-4,5 \mu\text{m}$) (MESSIAEN et CASSINI, 1968).

c)-Les chlamydospores

Les chlamydospores sont des formes de conservation, résultant de l'accumulation de réserves dans une région (article du mycélium ou conidie) qui se dilate quelque peu et s'entoure finalement d'une membrane épaisse de teinte généralement foncée (Figure 1) (DOMMERGUES et al., 1970). Elles sont hyalines, lisses ou rugueuses, globuleuses, terminales ou intercalaires ($5-15 \mu\text{m}$ de diamètre) (KOMI, 1993).



Caractéristiques du *Fusarium oxysporum* (BOTTON et *al.*, 1985).

2a - macrophialides ; 2b -macroconidies ; 2c -microphialides et microconidies 2d- chlamydospores.

2.4-Cycle de vie de *Fusarium oxysporum*

Les *Fusarium oxysporum* ne sont pas des parasites obligatoires : en l'absence d'hôte, ils vivent en saprophytes sur des débris végétaux et des matières organiques. Ils sont très abondants dans le sol ; des isollements montrent qu'un gramme de sol peut renfermer près de 100 000 propagules (SMITH, 1965). Ils persistent principalement sous forme de chlamydospores, spores de résistance au sein desquelles ils entrent en dormance (BOOTH, 1971). Ces chlamydospores peuvent survivre plusieurs années et germent en présence d'exsudats racinaires de la tomate (AGRIOS, 2005).

Après germination, les hyphes se dirigent vers la surface des racines et colonisent la rhizosphère (LESLIE & SUMMERELL, 2006). Le champignon pénètre principalement par les extrémités racinaires, les racines latérales et les blessures causées par les opérations culturales ou les nématodes (JONES et *al.*, 2014). Une fois à l'intérieur, il traverse l'épiderme et le cortex grâce à la pression mécanique et à des enzymes dégradant la paroi cellulaire, notamment les pectinases et les cellulases (AGRIOS, 2005 ; DI PIETRO et *al.*, 2003).

Atteignant le cylindre central, le parasite s'installe dans les vaisseaux du xylème où il produit des microconidies transportées par la sève vers les parties aériennes (BECKMAN, 1987). La colonisation du xylème provoque l'obstruction des vaisseaux par les hyphes, les spores et les gels produits par la plante, entraînant le flétrissement caractéristique de la fusariose vasculaire (BECKMAN, 1987 ; JONES et *al.*, 2014). À la surface des organes aériens peuvent parfois se

former des sporodochies, qui produisent des macroconidies susceptibles de contaminer d'autres plantes par le vent, l'érosion ou les insectes (EL MAHDJOUBI, 1972).

L'inoculum se conserve donc dans le sol et sur divers substrats sous forme de chlamydospores, tandis que la dissémination se fait principalement par les conidies (nombreuses sur les chancres du collet) et par les poussières de sol contaminé. Ces propagules peuvent être véhiculées par l'eau (réseaux d'irrigation, éclaboussures), le vent et les courants d'air, et le champignon peut être introduit localement via des terreaux ou des plants contaminés (BLANCARD, 1988).

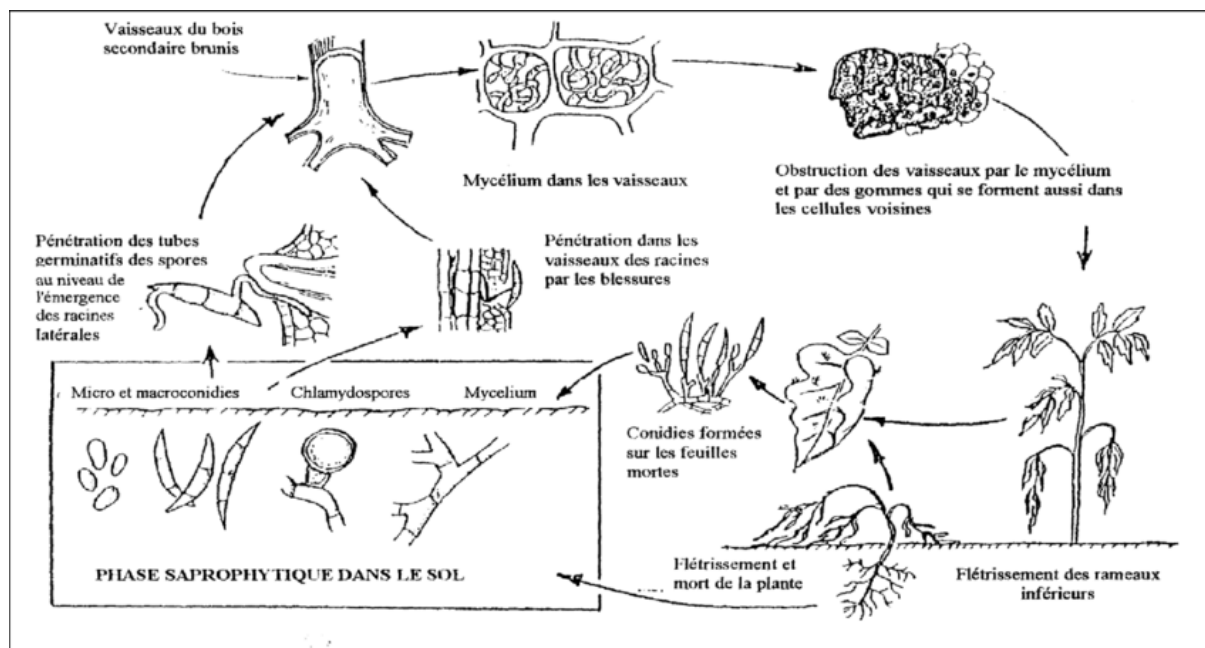


Figure 10 : Cycle de vie de *Fusarium oxysporum* (KABOUCH, 2014).

2.5-Symptômes

Comme c'est déjà mentionné précédemment, la tomate (*Solanum lycopersicum*) est sujette à deux maladies causées par des *Fusarium oxysporum*:

La flétrissure fusarienne classique (*Fusarium wilt*), provoquée par *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (SNYDER & HANSEN) ;

La pourriture des racines et du collet (*Fusarium crown and root rot*), due à *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* (JARVIS & SHOEMAKER) (KATAN et al., 1997).

Ces champignons sont telluriques et présentent une spécificité d'hôte marquée. Ils peuvent envahir l'ensemble du système vasculaire de la plante, provoquer son obstruction, l'affaiblir et mener à sa mort (SNISSI et al., 2006).

2.5.1-Le flétrissement fusarien

Le flétrissement fusarien est une maladie dévastatrice des cultures de tomate dans le monde. Elle est causée par *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol) (WALKER, 1971). Ce champignon tellurique pénètre dans la plante par les racines, envahit les tissus conducteurs (xylème) et provoque un jaunissement des feuilles, un flétrissement progressif et, en l'absence de contrôle, la mort de la plante (BLANCARD, 1997).

De nombreuses variétés de tomate résistantes à *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* ont été développées ; grâce à ces résistances, ce pathogène représente aujourd'hui un risque réduit pour la culture de la tomate dans les régions où ces variétés sont utilisées.

a) -Les symptômes externes :

La maladie évolue très rapidement, les parties des limbes touchés flétrissent comme par manque d'eau, c'est le flétrissement rapide (Quick wilt).

Les feuilles asséchées gardent leur chlorophylle et apparaissent avec un aspect gris verdâtre (LATERROT et al. 1978). Il s'ensuit un jaunissement puis une nécrose d'une partie ou de la totalité du limbe avec des éclaircissements au niveau des nervures.

L'atteinte des feuilles se fait progressivement de bas en haut ce qui fait que les feuilles se trouvant à la base de la plante sont déjà mortes (MESSIAEN, 1981 ; GINDRAT, 1975).

Il arrive fréquemment qu'un seul rameau soit atteint et ceci avant l'apparition des symptômes de la maladie sur le reste de la plante.

Au niveau de la tige de la plante atteinte, apparait une dépression longitudinale qui part du collet puis remonte unilatéralement. Les tissus au niveau de la dépression sont de couleur brune (BOUHOT, 1972).

D'autres symptômes peuvent parfois apparaître comme l'inclinaison et la courbure progressive vers le sol, des pétioles et des limbes (épinastie), le ralentissement de la croissance et la formation de bourrelets adventives sur la tige (LATERROT et al. 1978).



Figure 11 : Symptômes externe de flétrissure fusarienne sur tomate

b) -Les symptômes internes :

Une coupe longitudinale de la tige des plantes atteintes montre, dans la zone ligneuse adjacente au cortex, une coloration brun sombre des tissus conducteurs. Des coupes transversales révèlent également des zones de tissu brun foncé contenant souvent des fragments mycéliens



Figure 12 : Brunissement des vaisseaux conducteurs d'un plant de tomate infecté par *F. oxysporum* (Originale, 2026)

2.5.2-La pourriture racinaire :

La pourriture des racines et du collet est une maladie causée par *Fusarium oxysporum* f.sp.*radicis-lycopersici* (Forl) (JARVIS et SHOEMAKER, 1978).

Cette maladie a été découverte pour la première fois au Japon en 1969 (MENZIES et JARVIS, 1994) et s'est propagée à travers le monde à partir de 1970 (YAMAMOTO et al. 1974).

Elle a été signalée dans plusieurs pays du bassin méditerranéen où elle est plus ou moins dommageable (BLANCARD, 1997).

Cette maladie tellurique s'attaque aux plantules et entraîne leur mort (HENNI, 1998). Elle peut s'exprimer surtout à maturité lorsque les plantes sont chargées de fruits (BLANCARD, 1997).

Il existe des cultivars de tomate résistants au Forl mais ne sont pas largement utilisés (BRAYFORD,D,(1996).

a) -Les symptômes externes :

Contrairement aux maladies vasculaires classiques, des flétrissements plus ou moins prononcés apparaissent sur les folioles situées au sommet de la tige, laquelle s'amincit fortement dans cette zone. Selon les individus, ces flétrissements peuvent d'abord être réversibles pendant la nuit, et leur intensité varie en fonction des conditions climatiques.

Les flétrissements peuvent survenir brutalement et évoluer très rapidement vers la nécrose. Le dessèchement des folioles et des feuilles entraîne alors la mort des plantes.

Plusieurs auteurs signalent également l'apparition d'un jaunissement foliaire le long de la périphérie du limbe des feuilles âgées ; ce jaunissement est suivi de la nécrose des pétioles et

de la chute des feuilles. Certaines plantes infectées précocement présentent par ailleurs un ralentissement de la croissance.

Quelle que soit la gravité des flétrissements, il convient de rechercher les symptômes primaires au niveau des racines et du collet.

Sur les racines, de nombreuses lésions brun-rougeâtre, humides, apparaissent et évoluent rapidement en pourriture. Plus le diamètre des racines est faible, plus leur décomposition est rapide.



Figure 13 : Pourriture racinaire sur plants de tomate infecté par *Fusarium oxysporum*
(AGRIOS, 2005)

b) -Les symptômes internes :

D'une manière générale, le cylindre central des grosses racines révèle des brunissements assez marqués. Il en est de même pour les tissus vasculaires du pivot et ceux situés de part et d'autre de ces derniers.

Le brunissement peut s'étendre jusqu'à la tige sur plusieurs dizaines de centimètres au-dessus du collet.

Il convient à noter que le système vasculaire présente aussi quelques symptômes, bien que nous n'ayons pas à faire à une maladie uniquement vasculaire. Les racines adventives se développent parfois sur la tige pour faire face à l'attaque du champignon (BLANCARD, 1997).



Figure 14 : Pourriture racinaire sur plant de tomate infecté par *Fusarium oxysporum*
(Originale, 2026)

2.5.3-Les facteurs influençant la maladie

De manière générale, une humidité élevée favorise le développement des fusarioses. La température quant à elle joue un rôle déterminant dans l'expression des symptômes. En effet, la croissance optimale de *Fusarium oxysporum* se situe entre 25 °C et 28 °C, elle est inhibée au-dessus de 37 °C et ralentit en dessous de 17 °C (BARNA et al., 1983).

Ces champignons tolèrent une large plage de pH et peuvent se développer dans des conditions très variables ; la croissance de *F. oxysporum* a été observée dans une gamme étendue (SROBAR, 1978). Les fusarioses peuvent sévir quelle que soit la température du sol, bien qu'on ait longtemps considéré ce parasite comme favorisé par des substrats relativement « froids » (températures optimales signalées autour de 18–20 °C). La gravité de la maladie dépend également de l'agressivité des souches et augmente souvent lorsque les racines ont subi des stress hydriques (excès d'eau) ou thermiques (températures trop basses) au cours de la culture (BLANCARD, 1988).

2.5.4-Les races de *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* :

Trois races de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* ont été rapportées, se distinguant par leur virulence vis-à-vis des cultivars de tomate porteurs d'un seul gène de résistance (MCGRATH et al., 1987 ; STALL, 1962) : la race 1, la plus cosmopolite, a été initialement décrite en 1886 (BOOTH, 1971) ; la race 2 a été identifiée pour la première fois en 1945 dans l'Ohio ALEXANDER & TUCKER (1945) ; la race 3 a été observée en Australie en 1978 GRATTIDGE & O'BRIEN (1982) et signalée par la suite aux États-Unis (Californie, DAVIS et al. (1988) ; Floride, VOLIN & JONES (1982) ; Géorgie, CHELLEMI (1992) ; Arkansas et

Caroline du Nord, MARLATT et *al.* (1996) ; Tennessee, BOST (2001) ainsi qu'au Mexique (VALENZUELA-URETA et *al.* (1996). Actuellement, peu de cultivars résistants à la race 3 sont commercialement disponibles (JONES et *al.*, 1991).

2.6-Les moyens de lutte :

Les méthodes de lutte appliquées pour le contrôle des fusarioses sont généralement limitées, comme c'est le cas pour l'ensemble des maladies parasitaires vasculaires.

Il n'existe aucun moyen réellement efficace pour contrôler totalement ces maladies, les mesures de contrôle demeurent dans leur globalité d'ordre préventif (ROUXEL et *al.*, 1979).

a) La lutte culturale :

Elle consiste à éviter les conditions qui favorisent la maladie : un sol léger et acide, un manque d'azote et de calcium, des températures élevées supérieure à 28°C (Température optimale du développement du *Fusarium oxysporum*) et un manque de lumière.

La méthode de prévention la plus courante est le chaulage afin de maintenir le pH entre 6,4 et 7 (SCOTT, 1923).

Des chercheurs Taïwanais SUN ET HUANG (1985), ont mis au point un amendement organique et minéral qui permet de contrôler efficacement diverses espèces de *Fusarium*. Cet amendement est un mélange de 4,4% de bagasse (résidus de canne à sucre), 8,4% de son de riz, 4,25% de coquilles d'huîtres, 8,5% d'urée, 1,04% de nitrate de potassium, 13,16% de super phosphate de calcium et 60,5% de cendres minérales (BOOTH, 1971).

b) - La lutte agronomique :

Elle est considérée comme la plus pratique, elle consiste à stopper la culture de la plante qui héberge le *Fusarium* pendant plusieurs années, ainsi l'arrêt de l'exploitation des champs garantit l'apparition des chlamydospores.

c)- La lutte physique :

ANCHISI et *al.*, en (1985) ont utilisé un traitement à l'eau chaude pour protéger les plants dans un sol où la maladie est présente. La technique consiste à traiter les racines des plants avec de l'eau entre 48 et 49 °C pendant 30 secondes avant de les transplanter, cela stimule la croissance des racines. La taille des racines procure ainsi une protection contre la maladie.

La stérilisation ou la solarisation ne sont pas des solutions efficaces à long terme (CORBAZ, 1990).

c) - La lutte génétique :

Elle consiste à introduire des gènes de résistance au niveau des plantes appelées plantes transgénétiques. Ces gènes sont responsables de la synthèse de protéines capables d'éliminer le parasite. Cependant, cette technique fut inefficace car elle a été à l'origine de l'apparition de races plus virulentes (HENNI, 1998).

d) -La lutte chimique :

Elle est efficace mais présente beaucoup d'effets néfastes, elle se fait par une désinfection du sol à l'aide de fongicides. Les fongicides les plus usités reste le triazole et ces dérivés qui sont des composés très actifs grâce à leur noyau qui possède une activité pharmacologique, antibactérienne, antifongique et hypoglycémique (HAMOIR et *al.*, 2001).

e) -La lutte biologique :

La lutte biologique regroupe des procédés exploitant les relations de concurrence ou d'antagonisme entre organismes vivants, y compris des champignons, afin de réduire les dommages et l'abondance des agents phytopathogènes sans nécessairement les éliminer complètement (ALABOUVETTE et *al.*, 1986). Plusieurs chercheurs se sont intéressés aux microorganismes, comme les bactéries et les champignons, pour développer des méthodes de lutte capables de limiter la gravité des fusarioses (ALABOUVETTE et *al.*, 1986). De nombreux travaux ont ciblé des agents de lutte biologique pour contourner les problèmes de résistance aux fongicides ; un grand nombre de bactéries et de champignons antagonistes ont ainsi été identifiés, les résultats les plus probants ayant été obtenus avec des isolats de *Trichoderma* spp. Parmi les microorganismes testés avec succès contre Fol et Forl figurent *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*, certains isolats non pathogènes de *Fusarium oxysporum*, *Trichoderma harzianum*, *Aspergillus ochraceus* et *Penicillium funiculosum*. Ces agents ont réduit de manière significative les symptômes et ont diminué l'incidence de la maladie de 53% à 78%, performances parfois supérieures à celles des fongicides conventionnels, contribuant ainsi à l'augmentation des rendements (CARON et *al.*, 2002).

f) - La lutte intégrée :

C'est la combinaison de toutes les techniques précédentes afin de lutter contre les phytopathogènes pour une longue durée. Ces méthodes ne sont efficaces que si l'on a une meilleure connaissance des mécanismes qui sont à l'origine des interactions entre la plante et l'agent pathogène (CORBAZ, 1990).

Chapitre III :

Généralités sur les nanoparticules

Chapitre III : Généralité sur les nanoparticules (NPs) :

Les nanoparticules (NPs) sont des particules de très petite taille (1–100 nm) présentant des propriétés physico-chimiques distinctes de celles des matériaux à l'état massif (EL-SAADONY et *al.*, 2021; REDA et *al.*, 2021). En raison de leur rapport surface/volume élevé, les NPs améliorent les propriétés physiques, chimiques et biologiques des matériaux auxquels elles sont appliquées (ADHIKARI, 2010 ; EL-SAADONY et *al.*, 2021). Les nano-engrais fournissent des éléments nutritifs sous forme nanométrique et favorisent ainsi la croissance et la production des plantes (DIMKPA & BINDRABAN, 2016). Selon les besoins nutritionnels, ils se classent en trois catégories : nano-engrais macro-élémentaires, nano-engrais micro-élémentaires et engrais nanoparticulaires (CHIPA & JOSHI, 2016). Les nano-engrais peuvent être appliqués sous forme de poudre ou de solution liquide avec des particules de taille inférieure à 100 nm (JOSEF & KATARINA, 2015) ; ils délivrent les nutriments sous une forme plus facilement assimilable, ce qui améliore l'absorption par les plantes et augmente la productivité végétale.

Parmi leurs principales caractéristiques figurent un apport ciblé de nutriments (par application foliaire ou au sol), une efficacité fertilisante accrue, un coût et une empreinte environnementale potentiellement réduits, et un rôle dans la diminution de la pollution (GURU et *al.*, 2015). De plus, les nano-engrais peuvent contribuer à la dépollution de l'eau et apparaissent comme une alternative prometteuse aux engrais conventionnels.

3.1. Nanoparticules biologiques :

Ce sont des nanoparticules synthétisées par des procédés biologiques (« verts »), en utilisant des micro-organismes, des extraits de plantes, des biopolymères ou d'autres molécules d'origine naturelle comme agents de réduction, de stabilisation ou de matrice. Leur taille est généralement inférieure à 100 nm, comme pour les nanoparticules classiques, mais elles se distinguent par une toxicité réduite, une meilleure biodisponibilité et un impact environnemental moindre, car leur synthèse évite souvent les réactifs chimiques toxiques et les conditions énergétiques lourdes. Face à la demande croissante pour des technologies de synthèse de nanomatériaux respectueuses de l'environnement, efficaces et non toxiques, la bio-fabrication des nanoparticules (NPs) par des méthodes biologiques a suscité un grand intérêt (ABD-EL-HACK et *al.*, 2021 ; SAAD et *al.*, 2021 ; EL-SAADONY et *al.*, 2018 ; AKL et *al.*, 2020 ; EL-SAADONY et *al.*, 2021c, 2021d ; SHEIHA et *al.*, 2020). Les protéines, les enzymes, les alcaloïdes, les composés phénoliques, les pigments (ABDELNOUR et *al.*, 2020) et les amines sont les principales molécules responsables de la synthèse des nanoparticules chez les plantes et les micro-organismes (SHAH et *al.*, 2015 ; HASSANIN et *al.*, 2020 ; EL-SAADONY

et *al.*, 2021e). En revanche, les méthodes physiques sont coûteuses, tandis que les méthodes chimiques utilisent des solvants toxiques et ont des effets néfastes sur l'environnement.

La translocation des nanoparticules dans les plantes est inversement proportionnelle à leur taille et dépend également de l'espèce végétale, car les récepteurs varient d'une plante à l'autre : une plante peut agir comme accumulateur pour un type de nanoparticule et comme inhibiteur pour un autre. Différentes nanoparticules utilisent différents mécanismes pour améliorer la croissance des plantes (Singh, J., & Prasad, S., 2020). Lorsque les nanoparticules sont appliquées dans la rhizosphère, elles pénètrent dans les racines par endocytose, via des protéines porteuses ou par les plasmodesmes. Lorsqu'elles sont appliquées sous forme de pulvérisation foliaire, elles diffusent à travers les stomates et pénètrent dans les faisceaux vasculaires. Elles se déplacent également à l'intérieur de la plante en suivant les voies symplastiques et apoplastiques. La voie de déplacement dépend du type de plante et du type de nanoparticules (PEREZ-DE-LUQUE, 2017). Le détail des nanoparticules utilisées dans la synthèse des nanobiofertilisants est présenté ci-dessous.

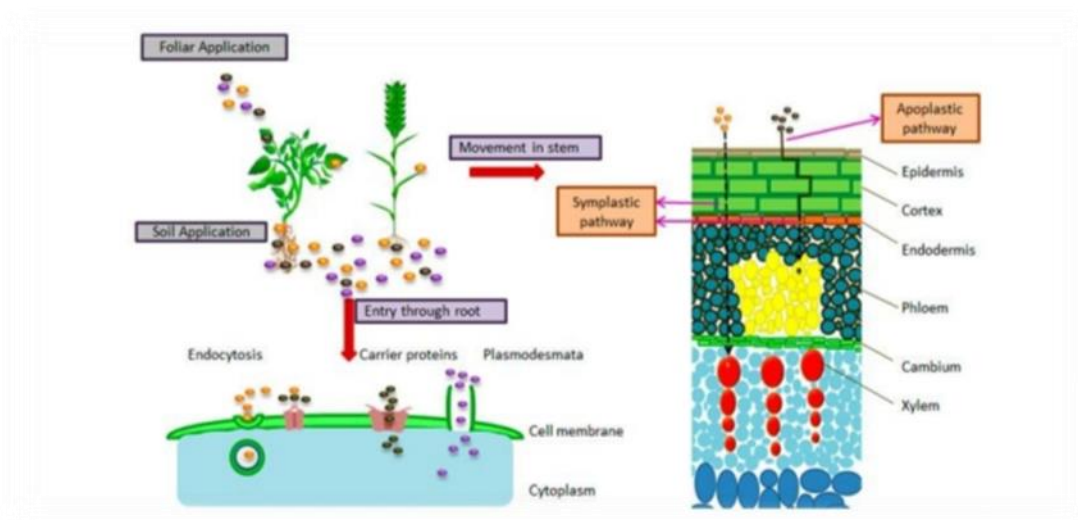


Figure 15 : L'application des nanoparticules et leur mouvement à l'intérieur des plantes.

(ANJUM et *al.*, 2019)

3.2- Rôle des nano-engrais dans le flux des nutriments :

Une grande partie des engrais inorganiques ajoutés au sol est perdue et devient indisponible pour les plantes. Par exemple, environ 40 à 70% de l'azote (N), 80 à 90% du phosphore (P) et 50 à 90% du potassium (K) sont perdus et/ou fixés dans le sol, ce qui entraîne des pertes importantes. Par conséquent, des quantités supplémentaires d'engrais sont souvent ajoutées au

sol pour compenser ces pertes, ce qui perturbe l'équilibre nutritif du sol et peut avoir des effets négatifs sur l'environnement (BARUAH & DUTTA, 2009).

Des études antérieures ont montré que les nanomembranes peuvent être utilisées pour enrober les particules d'engrais afin de permettre une libération lente et contrôlée des nutriments (TARAFDAR et al., 2012). Pour limiter l'utilisation excessive des engrais chimiques, les nano-engrais à libération lente apparaissent comme une solution prometteuse. Grâce à leur libération progressive durant le cycle de culture, ces nano-engrais permettent aux plantes d'absorber la majorité des nutriments nécessaires avec un minimum de pertes (HUIYUAN et al., 2018).

Les nanomatériaux, présents à la surface des particules d'engrais, augmentent leur résistance en raison de leur tension de surface élevée par rapport aux engrais traditionnels, ce qui améliore le contrôle de la libération des nutriments (BRADY & WEIL, 1999). De plus, des composés comme le mannose et les acides aminés sont souvent utilisés car ils facilitent l'absorption des nutriments. Les nano composites améliorent également la solubilité et la dispersion des nutriments dans le sol, ce qui augmente leur assimilation par les plantes (BABAEI et al., 2017). Par ailleurs, SHARIFI (2016) a montré que l'application foliaire de nanoparticules de zinc (Zn-NPs), combinée avec l'inoculation de *Bradyrhizobium japonicum*, améliore le rendement ainsi que la quantité et la qualité de l'huile chez le soja.

3.3- Mécanisme d'action toxique des nanoparticules (NPs) :

A fortes doses les nanoparticules agissent sur les cellules par plusieurs mécanismes complexes qui perturbent les fonctions vitales. Elles interfèrent avec la chaîne respiratoire, entraînant un dysfonctionnement de la production d'énergie (ATP) à cause de l'inhibition des enzymes et de la fuite des protons. Elles peuvent également interagir avec l'ADN, provoquant des altérations structurales, des cassures ou des mutations, et modifier l'expression de certains gènes liés au métabolisme et à l'équilibre des métaux.

Par ailleurs, les nanoparticules induisent la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), responsables d'un stress oxydatif important. Ce stress endommage l'ADN, les protéines et les lipides, perturbe la signalisation cellulaire et peut conduire à la mort cellulaire. Les ROS contribuent aussi à l'altération de la membrane cellulaire en augmentant sa perméabilité, ce qui compromet l'intégrité et le fonctionnement de la cellule.

En outre, les nanoparticules affectent les protéines et les enzymes en modifiant leur structure et en réduisant leur activité, ce qui perturbe des processus essentiels comme la division cellulaire,

la détoxification et le métabolisme. Bien que les cellules activent des mécanismes de défense contre le stress oxydatif, une production excessive de ROS entraîne un déséquilibre interne. Ainsi, la toxicité des nanoparticules repose principalement sur l'induction du stress oxydatif et la perturbation des fonctions cellulaires fondamentales, affectant l'énergie, le matériel génétique, les protéines et les membranes.

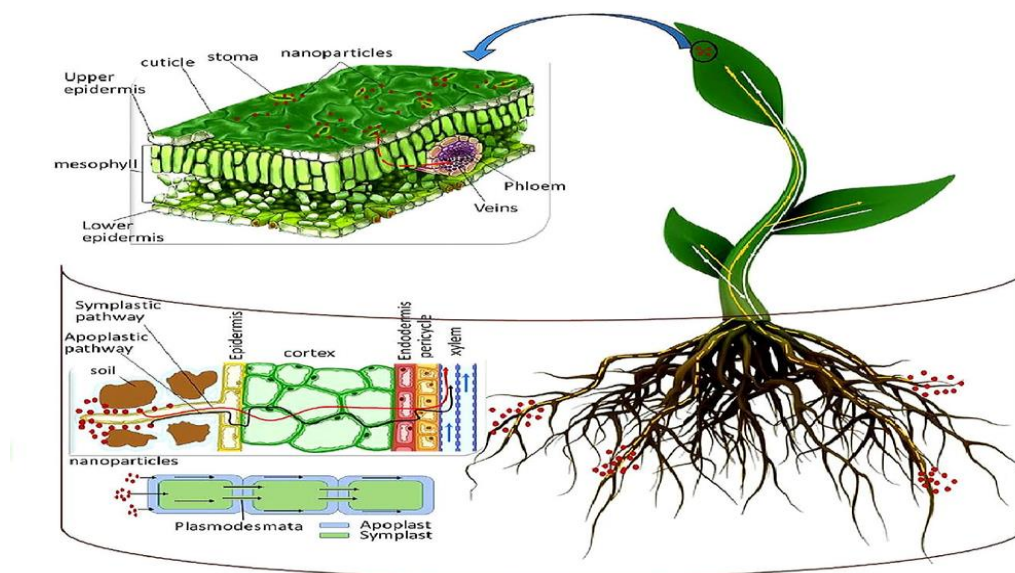


Figure 16 : Mécanisme d'action des nanofertilisants

3.4. Nanoparticules spécifiques et leurs rôles en agriculture

a) - Nanoparticules de silicium (SiNPs) :

Le silicium est présent en grande quantité dans le sol et est considéré comme une substance bénéfique pour les plantes. Il est présent sous forme d'acide monosilicique, de formule $\text{Si}(\text{OH})_4$. L'utilisation intensive des terres agricoles diminue la quantité de silicium dans le sol et entraîne une carence chez les plantes (CAUBET et *al.*, 2020). Selon une estimation, 210 à 224 millions de tonnes de silicium sont retirées des champs chaque année.

L'application de silicium améliore la production de métabolites et la croissance des plantes. Il développe une résistance ou une tolérance chez les plantes en conditions de stress. Les plantes possèdent des transporteurs de silicium qui transportent le silicium à contre-courant du gradient de concentration. Il a été rapporté que SIT1 permet le mouvement du silicium vers les cellules corticales, tandis que SIT2 transporte le silicium des cellules corticales vers le xylème.

L'absorption et la translocation du silicium chez les plantes dépendent de divers facteurs, notamment du type d'espèce végétale. Certaines plantes sont des accumulateurs de silicium,

tandis que d'autres ne le sont pas. Dans les accumulateurs au silicium, l'absorption de Si > 1% de la biomasse sèche de la plante, tandis que les non-accumulateurs ont une teneur en Si < 1% (MC GINNITY, 2015).

Le silicium est considéré comme un élément quasi essentiel. Il contrôle l'expression génétique de manière positive, rendant la plante tolérante au stress (GREGER et *al.*, 2018). Il réduit les effets négatifs du stress oxydatif chez les plantes et améliore l'absorption et le transport des nutriments des racines vers les parties aériennes des plantes. Il a été démontré que les plantes recevant un apport de silicium présentent une réduction du taux de transpiration et une augmentation du taux de photosynthèse. Il réduit également les effets néfastes des insectes et des agents pathogènes (ALI et *al.*, 2020).

Une étude a montré que l'application de silicium réduisait les dommages causés par le plieur de feuilles et le foreur de tiges chez *Oryza sativa* (HAN et *al.*, 2018). Elle a également montré des résultats positifs sur les plantes soumises à un stress hydrique. Les plantes ayant reçu un apport exogène de silicium ont montré une augmentation significative de la production d'antioxydants et d'hormones de croissance (HELALY et *al.*, 2017).

b) - Nanoparticules de zinc (ZnNPs)

Le zinc (Zn) est un élément essentiel de diverses enzymes végétales. C'est un micronutriment qui active différentes enzymes impliquées dans le métabolisme des glucides. Il joue un rôle important lors de la transcription de l'ADN et agit comme cofacteur d'enzymes. Il joue un rôle essentiel dans les voies biochimiques liées à la photosynthèse, à l'auxine, aux protéines, aux glucides et au métabolisme de l'amidon. Il maintient également la structure et les fonctions des membranes biologiques. De plus, il régule le taux de potassium dans les cellules et l'ouverture et la fermeture des stomates (SNEHAL ET LOHANI, 2018).

L'application de Zn diminue les dommages photo-oxydatifs et active les enzymes antioxydantes qui récupèrent les espèces réactives de l'oxygène. L'application de différents niveaux d'engrais à base de Zn sur *Triticum aestivum* a montré qu'une concentration de Zn de 11,4 kg/ha, améliore significativement la surface racinaire, le poids sec des pousses, le poids sec des racines et la longueur des racines (DANISH TOOR et *al.*, 2020).

Dans une autre expérience sur le terrain, l'application de Zn à raison de 15 kg/ha a accéléré la hauteur des plantes, la formation des panicules et la formation des soies de *Zea mays*. Elle a également amélioré le rendement en grains et la teneur en protéines. L'utilisation de Zn améliore la croissance des plantes dans des conditions environnementales défavorables. L'application foliaire d'engrais à base de Zn améliore la qualité et la quantité des cultures, mais l'utilisation

excessive d'engrais chimiques provoque un déséquilibre et diminue la croissance et le rendement des cultures (MA et *al.*, 2017).

L'application de ZnNPs réduit les effets néfastes des stress biotiques et abiotiques. Elle détoxifie les métaux lourds, augmente l'efficacité de l'utilisation de l'eau, maintient la stabilité de la membrane et équilibre l'absorption des nutriments. Différents niveaux d'application de ZnNPs augmentent le rendement de *Sorghum bicolor* L., de 22 à 183% sous stress hydrique par rapport aux plantes non traitées. Ils améliorent également l'activité de piégeage des radicaux DPPH (2,2-diphényl-1-picryl-hydrazyl-hydrate) dans les racines et les pousses de *Camelina sativa* L. cultivée en sol salin (AKHAVAN HEZAVEH et RAHMANI, 2020).

Lorsque les nanofertilisants de Zn et de Fe ont été appliqués sous forme de pulvérisation foliaire, ils ont amélioré les attributs morphologiques et augmenté significativement le rendement et les composantes du rendement. Ils ont amélioré le rendement de *Cicer arietinum* L. de 34% par rapport au témoin. Il a également été observé que l'application exogène de ZnNPs améliore les structures anatomiques de la feuille et de la tige et augmente le taux de photosynthèse. Le rendement de *Solanum melongena* L. a également été augmenté de 50% à 66% cultivé dans un sol salin en présence d'un approvisionnement en eau limité (SEMIDA et *al.*, 2021).

c) - Nanoparticules de cuivre (CuNPs)

Le cuivre (Cu) est un nutriment essentiel à la croissance normale des plantes. Il joue un rôle structural et fonctionnel chez les plantes. C'est un micronutriment, et sa teneur dans la plante dépend de sa mobilité et de sa biodisponibilité dans le sol. Les plantes maintiennent la quantité de Cu à un niveau optimal dans divers tissus. Il intervient dans divers processus au sein des mitochondries et des chloroplastes. Ses fonctions comprennent le trafic des protéines, la respiration mitochondriale, la mobilisation du fer, la signalisation hormonale et le métabolisme cellulaire. Le Cu est un composant structural de la plastocyanine. Il améliore la production de peroxyde d'hydrogène, une molécule de signalisation, et développe la tolérance ou la résistance au stress chez les plantes. Il diminue le flétrissement des plantes en renforçant la paroi cellulaire. L'application exogène de Cu améliore la production de biomasse chez les plantes et améliore également le rendement et la qualité des plantes (LAFMEJANI et *al.*, 2018).

La carence en Cu chez les plantes entraîne l'enroulement des feuilles, un retard de croissance et une chlorose, et perturbe le processus de photosynthèse. La carence en Cu favorise la production d'espèces réactives de l'oxygène. Elle affecte les photosystèmes et le flux d'électrons dans la chaîne de transport d'électrons. La carence en Cu diminue également le métabolisme de l'azote et des glucides (SHABBIR et SARDAR, 2020).

L'absorption rapide et la libération lente des CuNPs en font un excellent candidat. Il a été démontré que l'application de Cu et de ZnNPs améliorait les paramètres morphologiques et physiologiques de *Ocimum basilicum* L. Elle améliore le statut hydrique, maintient le taux de photosynthèse et renforce l'activité des antioxydants pour créer une tolérance à la sécheresse chez les cultures. L'application foliaire de CuNPs améliore la qualité des fruits de *S. lycopersicum*. Elle favorise également la synthèse de composés bioactifs et l'activité de la catalase et de la superoxyde dismutase (LOPEZ-VARGAS et ORTEGA-ORTIZ, 2018).

d) - Nanoparticules de fer (FeNPs)

Le fer est l'un des micronutriments essentiels à la croissance des plantes. C'est un cofacteur qui agit comme catalyseur dans diverses réactions biochimiques. Il est nécessaire à la synthèse de différentes enzymes et à la régulation de la photosynthèse et de la respiration. Une carence en fer réduit la synthèse de chlorophylle, ce qui provoque le jaunissement des feuilles. Elle provoque une nécrose et une chlorose des feuilles. L'application de fer comme engrais améliore la croissance des plantes et réduit les effets néfastes des stress environnementaux (VAGHAR et SAYFZADEH, 2020).

L'application de nanofertilisants réduit les effets néfastes des engrais chimiques, et leur application par voie racinaire et foliaire est utile pour améliorer la croissance des plantes. La synthèse verte de FeNPs est réalisée à l'aide d'extraits de plantes. Les plantes couramment utilisées sont *Citrus sinensis*, *Azadirachta indica* et *Eucalyptus tereticornis* (Sm.) (HERLEKAR et BARVE, 2014). Les composés phytochimiques de l'extrait de plante réduisent la taille du sel de Fe et stabilisent la réaction. Les FeNPs couramment utilisés sont l'hydroxyde d'oxyde de fer, l'oxyde ferrique, l'oxyde ferreux ferrique et le complexe minéral de fer. L'utilisation de FeNPs génère des réponses positives lorsqu'elle est appliquée à des plantes soumises à un stress (EBRAHIMINEZHAD et ZARE-HOSEINABADI, 2017).

L'application de FeNPs induit une absorption sélective de substances à partir de la membrane racinaire. Il réduit l'absorption de sodium, ce qui augmente la teneur en potassium dans les pousses et rend la plante résistante à la salinité. L'application combinée de FeNPs et d'acide salicylique induit des caractéristiques de tolérance à la sécheresse chez *Fragaria vesca*, car ils montrent de bons résultats lorsqu'ils sont appliqués à la culture « *in vitro* » de plantes (MOZAFARI et HAVAS, 2018).

e) - Nanoparticules d'argent (AgNPs)

Les ions argent jouent un rôle important dans la formation des pousses, la formation des racines, l'embryogenèse somatique et la transformation génétique. L'application d'argent diminue la synthèse d'éthylène chez les plantes et réduit les risques de destruction de la chlorophylle et de

chlorose. Elle stimule également la production de métabolites secondaires, régule négativement le processus de vieillissement et améliore la croissance et le rendement en grains des cultures (YASMEEN et RAZZAQ, 2015).

Le rôle des nanoparticules dans les plantes dépend de leurs propriétés, telles que leur composition chimique, leur réactivité de surface et leur taux d'application (ÖKTEM et KELES, 2018). Une concentration élevée de nanoparticules provoque des effets néfastes. Parallèlement, la dose appropriée induit une réponse positive chez les plantes, et la quantité de dose est liée au type d'espèce végétale.

L'application d'AgNPs synthétisés à partir de globules d'Eucalyptus Labill. a amélioré la germination et l'activité antioxydante chez *Allium cepa* L., *Z. mays* et *Trigonella foenum-graecum* L. (SOLIMAN et QARI, 2020).

L'utilisation d'AgNPs dans la culture de *Dianthus chinensis* L. a réduit l'hyperhydricité et la production de peroxyde d'hydrogène à 13% et 50%, respectivement. Ils ont également réduit la production d'espèces réactives de l'oxygène et amélioré la longueur des racines chez *G. max*. Ils ont augmenté la teneur en caroténoïdes, en chlorophylle et en polyphénol oxydase à 46%, 45% et 33%, respectivement, chez *S. lycopersicum* infecté par *Alternaria alternata*. La diminution de la gravité de la maladie était de 58% par rapport aux plantes non traitées (MAHAWAR et PRASANNA, 2020).

L'absorption d'eau n'est pas constante chez les plantes tandis que les feuilles absorbent activement les nutriments appliqués sous forme de pulvérisation foliaire. Il s'agit d'une méthode peu coûteuse et plus réalisable que l'application au sol (AHMADI-MAJD et NEJAD, 2021). L'application foliaire d'AgNPs a augmenté le poids frais et la teneur en chlorophylle de 32% et 23%, respectivement, chez *S. lycopersicum* infecté par *A. solani*. La diminution du nombre de spores fongiques a été de 48%, et l'activité des enzymes de stress, responsables de la tolérance au stress chez les plantes, a été renforcée. Elles ont également amélioré le taux de germination des graines, la longueur des racines, la longueur des pousses et la biomasse chez *Satureja hortensis* L. confrontée à un stress salin (NEJATZADEH, 2021).

3.5. Perspectives d'avenir des nano biofertilisants

Les biofertilisants contiennent des microbes bénéfiques tels que les algues bleu-vert (BGA), les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR), les mycorhizes fongiques ou les matières végétales transformées (VAFA et SOHRABI, 2021). Le concept de biofertilisant remonte aux écrits de la Rome antique et de la Grèce classique décrivant différentes pratiques

agricoles visant à améliorer le rendement des plantes. L'utilisation et la commercialisation de microbes comme biofertilisants ont commencé à la fin du XIX^e siècle.

L'utilisation massive d'engrais chimiques pollue actuellement l'agroécosystème. C'est l'une des principales sources de pollution des sols, de l'eau et de l'air. Développer une alternative bon marché, non toxique et écologique pour obtenir une productivité agricole élevée sans effets secondaires est la nécessité actuelle. Les biofertilisants sont écologiques, rentables, durables et ont des effets durables. Ils colonisent la rhizosphère des plantes et améliorent leur croissance en augmentant la disponibilité des nutriments (ENRICO et PICCINETTI, 2020). Les nanobiofertilisants sont composés de nanoparticules et de biofertilisants. L'utilisation des nanoparticules n'est pas encore courante et elles sont encore à l'essai (BHARI et KAUR, 2021). L'utilisation des nano biofertilisants devrait croître pour le développement de l'agriculture. Cependant, leur formulation doit être respectueuse de l'environnement, des plantes et de l'homme.

Données expérimentales

Chapitre I :

Matériel et Méthodes

Chapitre I : Matériel et Méthode

1.1. Objectif :

L'objectif de la présente étude est d'évaluer l'activité antifongique de deux nanoparticules biosynthétisées à partir d'extraits d'une plante médicinale (*Myrtus communis*), en testant « in vitro » et « in vivo » leur efficacité contre deux isolats de *Fusarium oxysporum*, agents de la fusariose sur tomate, et à comparer leur effet à celui de *Trichoderma* afin d'apprécier leur potentiel comme alternative de biocontrôle.

L'étude « in vitro » a été réalisée au niveau du laboratoire pédagogique de protection des végétaux, alors que l'étude « in vivo » a été réalisée au niveau d'une serre établie au niveau du site 3 de l'université de Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem (ex ITA).

1.2. Matériel biologique

1.2.1-Matériel fongique :

Le matériel fongique utilisé dans cette étude est constitué de deux isolats fongiques appartenant à l'espèce *Fusarium oxysporum*. Les deux isolats désignés respectivement *Fusarium oxysporum*1 et *Fusarium oxysporum* 2 ont été obtenus à partir de plants de tomate présentant des symptômes typiques de la fusariose (Flétrissement, jaunissement des feuilles, retard de croissance, pourriture des racines) se trouvant dans une serre de tomate située au niveau de l'atelier expérimental de l'université de Mostaganem sis à Mazagran, commune de mazagran.

1.2.2-. *Trichoderma* sp. :

Le *Trichoderma* sp., utilisé pour le test a été isolé à partir du sol de la culture de tomate. L'identification de *Trichoderma* sp. a été basée sur des critères morphologiques macroscopique et microscopiques, notamment la couleur verte caractéristique des colonies, la croissance rapide, ainsi que la morphologie des colonies.

1.2.3- Nanoparticule :

Les nanoparticules utilisées pour ce test sont biosynthétisées à partir des extraits des feuilles du myrte (*Myrtus communis*), qui nous a été aimablement fourni par Dr Belhadj Amel Kenza.



Figure 17 : Nanoparticule de Zn et Fe utilisés pour nos différents tests.

1.3. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est constitué de plants de tomate (*Solanum Lycopersicum*), appartenant à la variété hybride Redy F1, de la société Global Seeds. Cet hybride, issu d'un croisement contrôlé entre lignées sélectionnées, confère aux plants une forte vigueur, une productivité élevée et une homogénéité.



Figure 18 : Emballage des semences de la variété Redy hybride F1 de la société Global Seeds (Original, 2026)

1.4-Méthodes utilisées

1.4.1-Isolement de l'agent pathogène à partir des racines de tomate contaminées :

Des plantes présentant des symptômes de fusariose (jaunissement, pourriture et flétrissement) ont été sélectionnées pour l'isolement. Les racines ont été soigneusement extraites du sol, placées dans des sacs stériles et transportées au laboratoire.

En conditions stériles, les racines ont été lavées à l'eau distillée puis coupées en petits fragments à l'aide d'un scalpel stérile (Figure 18) afin d'éliminer les tissus non symptomatiques et de faciliter l'accès aux tissus contaminés. Les fragments ont été immergés dans une solution d'hypochlorite de sodium à 2° Chlor pendant 10 minutes. Ils ont ensuite été rincés soigneusement dans trois bains successifs d'eau distillée stérile et séchés sur papier filtre stérile

avant d'être placés en culture sur milieu PDA à raison de quatre fragments par boîte de Petri. Avant l'incubation, les boîtes de Pétri ont été soigneusement étiquetées et bien fermées. Dans le cadre de cette expérience, plusieurs isolements ont été réalisés afin d'augmenter les chances d'obtenir le champignon ciblé.

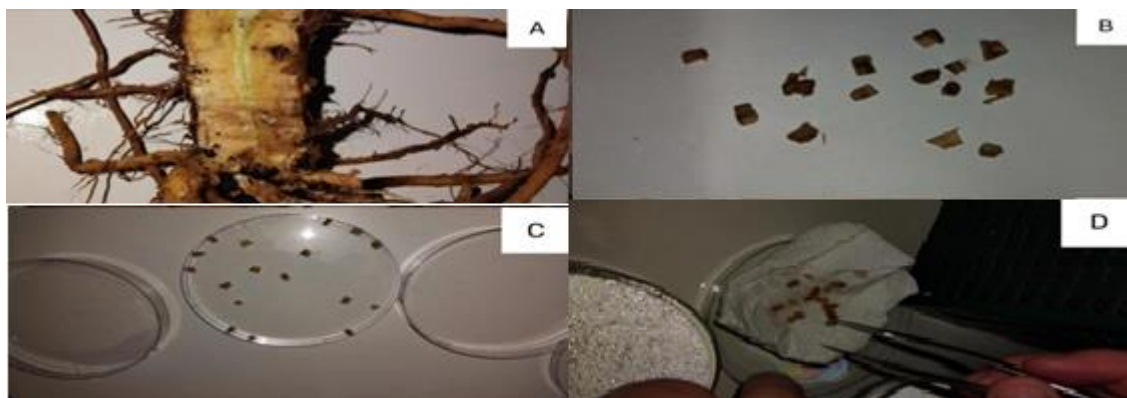


Figure 19: Les différentes étapes de l'isolement

A : racine contaminée ; B : fragments de racines C : désinfection D : séchage

1.4.2- Isolement de l'agent antagonisme à partir du sol :

L'isolement de *Trichoderma* à partir du sol, est réalisé selon la méthode de suspension dilution « Dilution plates » décrite par DAVET et ROUXET (1997), sur le milieux gélosés PDA. Selon les étapes décrites ci-dessous

Des échantillons de sol sont prélevés à proximité des racines des plants de tomate utilisés pour l'isolement du pathogène), ont été collectés de la région de Mazagran (Atelier expérimental de l'université de Mostaganem). Ce type de sol constitue un habitat favorable à la présence de *Trichoderma*.

Une quantité de 10 g de sol de chaque échantillon a été mise en suspension dans 90 ml d'eau distillée stérile. Le mélange a été agité pendant 30 minutes afin d'homogénéiser la solution. Par la suite, une série de dilutions décimales (10^{-1} à 10^{-3}) a été réalisée (LEGHLIMI, 2013).

L'ensemencement est effectué en étalant 1 ml de chaque dilution à la surface de milieux PDA, additionné d'un antibiotique afin d'éviter les contaminations bactériennes. Les boîtes de Pétri ont ensuite été incubées à 25 °C pendant une durée de 7 jours (BENNAMA et MEDDAH, 2025).

La purification a été réalisé en prélevant une petite bouture mycélienne à la marge du thalle et de l'ensemencer de manière aseptique dans des boîtes de Pétri contenant le PDA. Afin d'obtenir un développement typique du champignon, l'inoculation est réalisée en un seul point au centre de la boîte (ALMI, 2016).

Pour l'identification de l'isolat nous nous sommes basés sur leurs aspects macroscopiques et microscopiques.

1.4.3- Identification des champignons isolés :

a) -Identification macroscopique

L'examen macroscopique des isolats permet d'évaluer les caractéristiques culturelles et morphologiques des champignons, telles que le taux de développement, le diamètre des colonies, la texture du mycélium et la pigmentation. L'observation macroscopique repose sur l'inspection visuelle des boîtes de Pétri contenant des cultures pures.

b) - Identification microscopique :

On prélève soigneusement un fragment de la culture à l'aide d'une anse stérile, puis on le place entre une lame et une lamelle. Il peut être nécessaire de prélever plusieurs échantillons, à la périphérie et au centre des colonies, et de répéter l'opération afin d'obtenir une préparation pour l'observation de la conidiogenèse (ALMI, 2016).

L'identification microscopique d'un champignon prend en compte les caractères suivants :

- ✓ La morphologie du mycélium : forme, présence ou absence de cloisons (septation), couleur et mode de ramification ;
- ✓ La morphologie des spores : forme, taille, septation et arrangement (conidies macro/micro, chlamydospores, etc.) ;
- ✓ La morphologie générale du champignon, incluant les structures reproductrices (conidiophores, phialides, sporodochies) et l'aspect des tissus observés.

1.4.4- Technique de culture monospores :

Il s'agit d'une technique permettant d'obtenir une culture pure de *Fusarium oxysporum* à partir d'une seule spore. Cette méthode consiste à préparer des dilutions successives de solution conidienne (mère, 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5}).

Dans un tube à essai stérile, une colonie fongique fraîchement cultivée est immergée dans 5ml d'eau distillée stérile. Ainsi préparer cette solution mère est agitée vigoureusement à l'aide d'un vortex, afin de libérer les conidies et homogénéiser la suspension. Des dilutions décimales sont ensuite réalisées dans 5 tubes à essai stériles.

Ensemencement est réalisé en prélevant 100-200 μ L des tubes correspondant aux dilutions élevées (10^{-4} et 10^{-5}) ; puis en les étalant séparément dans des boîtes de Pétri contenant le milieu PDA. Ainsi obtenues les cultures sont mises à incuber à 25 ± 2 °C et observer quotidiennement.

Après 48–72 h, les colonies les plus petites, et bien séparées sont repérés, puis prélever soigneusement à l'aide d'une anse stérile. Elles sont ensuite, transférer séparément sur de nouvelles boîtes de Petri contenant du milieu PDA.

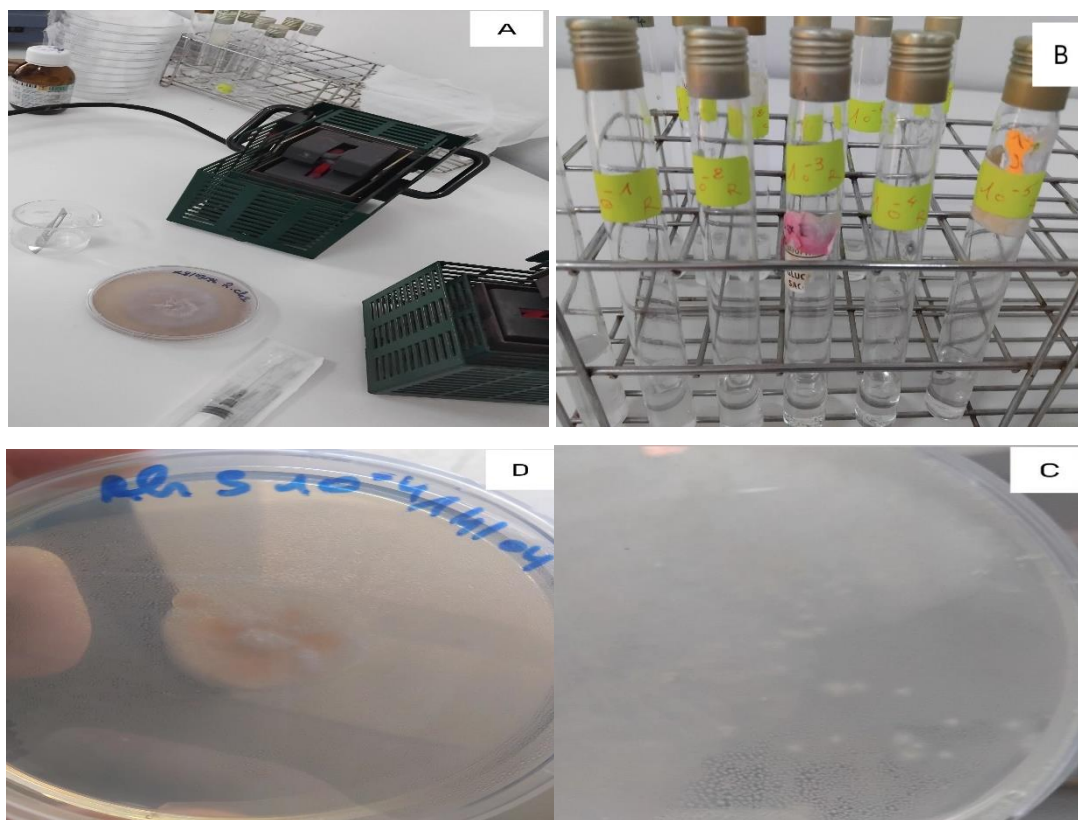


Figure 20: Etapes de la culture monospores des isolats fongiques (Originale, 2026)

A : culture de *Fusarium oxysporum* **B :** dilutions successives de la solution conidienne **C :** colonies issus d'une seule spore **D :** Culture monospore

1.4.5 - Évaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO et Fe₃O₄ vis-à-vis de deux isolats de *Fusarium oxysporum*

Dans des conditions d'asepsie, l'évaluation de l'efficacité *in vitro* des deux nanoparticules ZnO et Fe₃O₄ sur les deux isolats de *Fusarium oxysporum*, phytopathogènes de la tomate a été réalisé en commençant par préparer deux solutions mères en mettant en suspension 40 mg de chaque nanoparticule dans 10ml d'eau pure à laquelle nous avons additionné une goutte de Tween 20. Pour chaque isolat fongique, 12 flacons de milieu PDA ont été préparés, chaque flacon permettant la préparation de six boîtes de Pétri. Pour obtenir le premier volume de 200 ml, 10 ml de cette suspension mère ont été ajoutés à 190 ml d'eau stérile, puis un antibiotique (gentamicine) a été incorporés et le mélange a été homogénéisé. Les 6 boîtes de Pétri du premier flacon ont été coulées, puis le reste du flacon a été utilisé pour préparer le flacon suivant en complétant à 200 ml, et la procédure a été répétée de manière à obtenir quatre concentrations

de nanoparticules (100%, 50%, 25% et 12,5%) ainsi que des témoins positif (sans tween) et négatif (sans nanoparticule). Les boîtes ainsi préparées ont été inoculées avec les champignons, 3 boîtes pour chaque isolat de *Fusarium oxysporum*. Les boîtes obtenues ont été fermées hermétiquement et surveillées pendant 14 jours pour évaluer la croissance mycélienne ainsi que la vitesse de croissance.

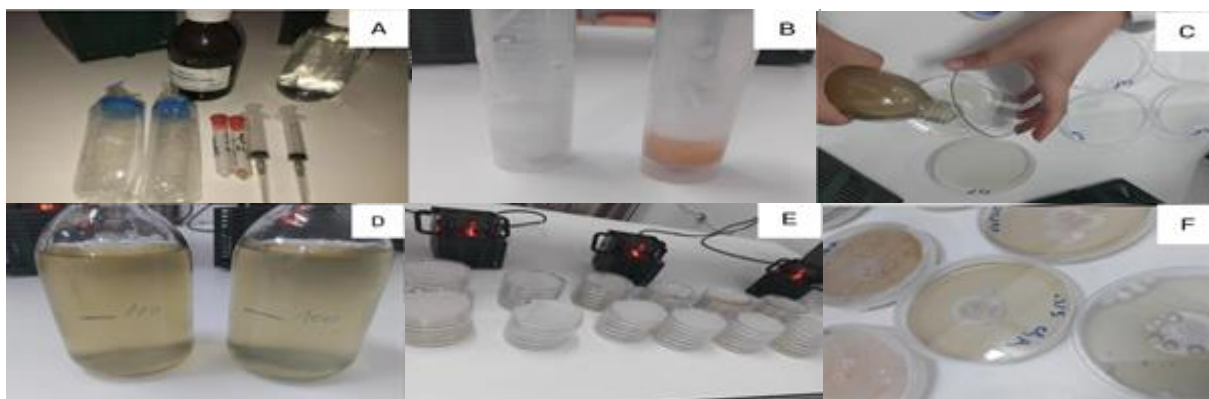


Figure 21: Les différentes étapes du test de l'évaluation in vitro de l'effet antifongique

A : préparation des solutions mère **B** : suspension des nanoparticules **C** : répartition du milieu de cultures enrichi de nanoparticules **D** : Dilution des nanoparticules dans le milieu PDA **E** : boîtes de petri contenant PDA + nanoparticules **F** : début du développement de *Fusarium oxysporum*

a) Méthode d'évaluation de la croissance mycélienne

Pour l'estimation de la croissance mycélienne, la technique employée est celle décrite par BREWER (1960) et LEACH (1962) in SIAH (2004), qui consiste à mesurer la croissance linéaire et diamétrale des colonies en utilisant la formule suivante :

$$L = \frac{D - d}{2}$$

L : croissance mycélienne.

D : diamètre de colonie.

d : diamètre de l'explant

b) Méthode d'évaluation de la vitesse de croissance

Afin d'établir la vitesse de croissance en fonction du temps, des mesures journalières du diamètre de la colonie RAPPILY (1968), sont effectuées en appliquant la formule suivante :

$$v = \frac{(L_2 - L_1) + (L_3 - L_2) + (L_4 - L_3) + \dots (L_n - L_{n-1})}{n - 1}$$

V : vitesse de la croissance en (cm/j)

L : croissance mycélienne en (cm)

c) Méthode d'évaluation du taux d'inhibition de la croissance mycélienne

L'évaluation de l'inhibition exercée par les deux isolats de *Fusarium oxysporum* est estimée par le calcul du pourcentage d'inhibition de la croissance mycélienne selon la formule suivante (BELLAHCENE, 1990) :

$$I(\%) = \left(1 - \frac{V_n}{V_0}\right) \times 100$$

I (%) : Taux d'inhibition de la croissance mycélienne.

V_n: vitesse de croissance des colonies en présence de l'antagoniste (cm/j)

V₀ : la vitesse de croissance des colonies témoins (cm/j).

d) Méthodes d'évaluation de la sporulation :

La sporulation de *Fusarium oxysporum*, a été estimée après 14 jours d'incubation, Le comptage a été effectué à l'aide de la cellule de Malassez. Les valeurs sont exprimées en nombre de spores par unité de volume (ml). Le milieu de culture est raclé et mis dans un bécher contenant 10 ml d'eau distillée. La solution obtenue est ensuite mise sous agitation afin d'extraire les spores, puis filtrée à l'aide d'un tissu en mousseline dans un entonnoir menant à un bécher, pour éliminer les débris (fragments mycéliens) qui pourraient interférer avec l'observation. De chaque suspension ainsi préparée, on prélève 3 échantillons de 100 µl qui sont examinés sous microscope au grossissement X 40. A l'aide d'une cellule de Malassez, on compte alors le nombre de conidies pour chaque échantillon (YSSAAD et MEDAOUAR, 2018).

1.4.6- Évaluation « *in vivo* » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO et Fe₃O₄ vis-à-vis de deux isolats de *Fusarium oxysporum*

a) mise en place de la culture de tomate

L'étude *in vivo* est réalisée au niveau d'une serre en plastique de dimensions 25×8m×10 m (longueur× largeur × hauteur), implanté au niveau du site 3 de l'université de Mostaganem. Le semis des graines de tomate variété Redy F1, a été effectué dans des plaques alvéolées remplies de terreaux désinfectée.

La mise en pots des plantules obtenus après le semis a été précédé par une désinfection des pots par l'eau de javel à 2°chlor afin d'éviter toute contamination. Nous avons procédé également à la stérilisation du substrat de culture en l'occurrence le terreau à la chaleur humide dans une autoclave à 120°C pendant 20mn.



Figure 22 : La serre expérimentale au niveau du site 3, de l'Université de Mostaganem (Original, 2026).



Figure23 : Sacs ayant servi à la stérilisation du terreau (original 2026)

La mise en pots a été réalisée le 29/04/2026. Avant le remplissage des 51 pots avec du terreau stérile, une couche de gravier préalablement stérilisé a été déposée au fond de chaque pot afin de limiter la perte de substrat et d'assurer un bon drainage. Les pots ont ensuite été remplis de terreau stérile. Par la suite, un petit trou a été creusé dans chaque pot, dans lequel deux plants ont été déposés, puis les plantules ont été soigneusement recouvertes de substrat. Après la plantation, les plantules ont été arrosées avec de l'eau du robinet stérile. Des arrosages journaliers ont ensuite été effectués.



Figure 24 : Pots après leur remplissage avec du terreau stérile sont couverts en attendant la plantation des plants

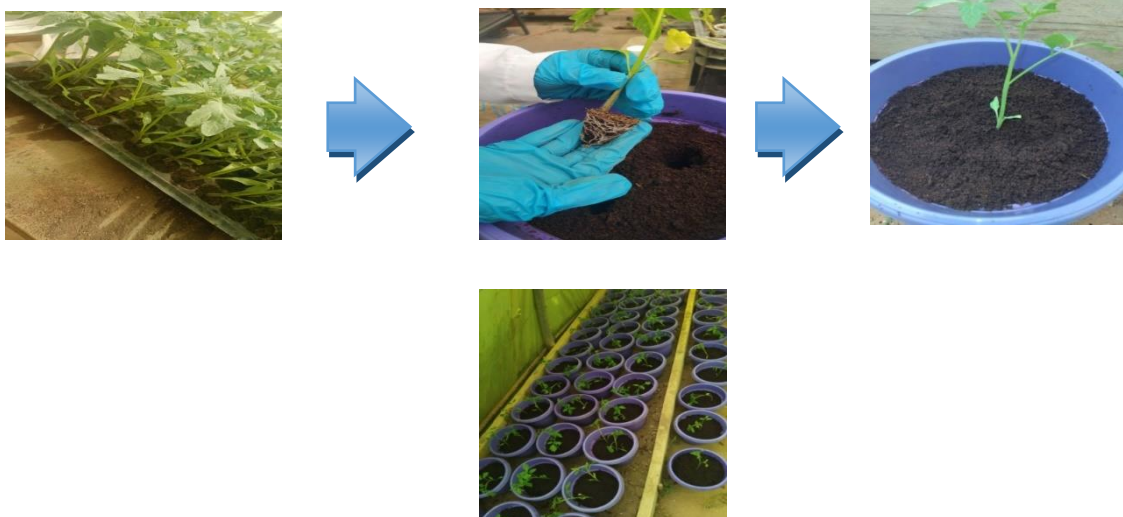


Figure 25 : Mise en pots des plantules de tomates

b) Préparation de l'inoculum

La préparation de l'inoculum a été réalisée dans des conditions aseptiques. Les boîtes contenant les deux isolats de *Fusarium oxysporum* ont été transférées dans un milieu liquide (PDA sans gélose), puis incubées pendant 6 jours sous agitation de 6h par jour, afin d'obtenir une forte

concentration en spores. À l'issue de l'incubation, la suspension a été filtrée, puis le filtrat obtenu a été ajustée à l'aide de la cellule Malassez à une concentration de 10^6 conidies par ml, puis utilisé comme inoculum pour le test in vivo.

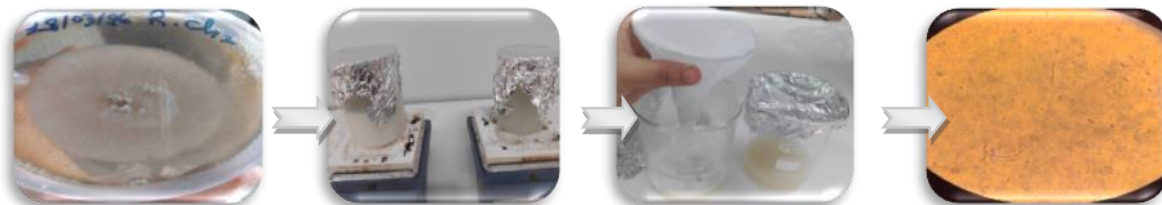


Figure 26 : Etapes de préparation de l'inoculum des deux isolats de *Fusarium oxysporum*

A : Grattage B : Agitation C : Filtration D : Comptage à l'aide de la cellule de Malassez

c) Conduite de l'essai

Trois concentrations de suspension de nanoparticules dans de l'eau pure ont été préparées : 1 g/L, 0,5 g/L et 2,5 g/L. Le traitement par les nanoparticules ayant une visée préventive, a été appliqué trois jours avant l'inoculation des champignons. En parallèle, un traitement à base de *Trichoderma* sp., a été réalisé afin de servir de témoin biologique. La suspension des nanoparticules a été arrosé au pied de la plante, le long du collet.

L'inoculation des isolats de *Fusarium oxysporum* a été réalisé le 3^{ème} jours du traitement, le 01/06/2026. A l'instar de la suspension des nanoparticule, l'inoculation a été réalisé par arrosage au pied des plantules.

Le test in vivo a comporté 51 pots, correspondant à 9 traitements avec trois répétitions pour chaque traitement. Les traitements sont les suivants :

- ✓ *F.oxysporum* 1 X NPS1 X 3 concentrations (1g/l, 0,5 g/l et 0,25 g/l)
- ✓ *F oxysporum* 2X NP_s 1 X 3 concentrations (1g/l, 0,5 g/l et 0,25 g/l)
- ✓ *F oxysporum* 1 X NP_s 2 X 3 concentrations (1g/l, 0,5 g/l et 0,25 g/l)
- ✓ *F oxysporum* 2X NP_s 2 X3 concentrations (1g/l, 0,5 g/l et 0,25 g/l)
- ✓ *F oxysporum* 1X *Trichoderma* sp.
- ✓ *F oxysporum* 2X *Trichoderma* sp.
- ✓ *F oxysporum* 1 (témoin)
- ✓ *F oxysporum* 2 (témoin)
- ✓ Plants non inoculés et non traités (Témoin négatif)

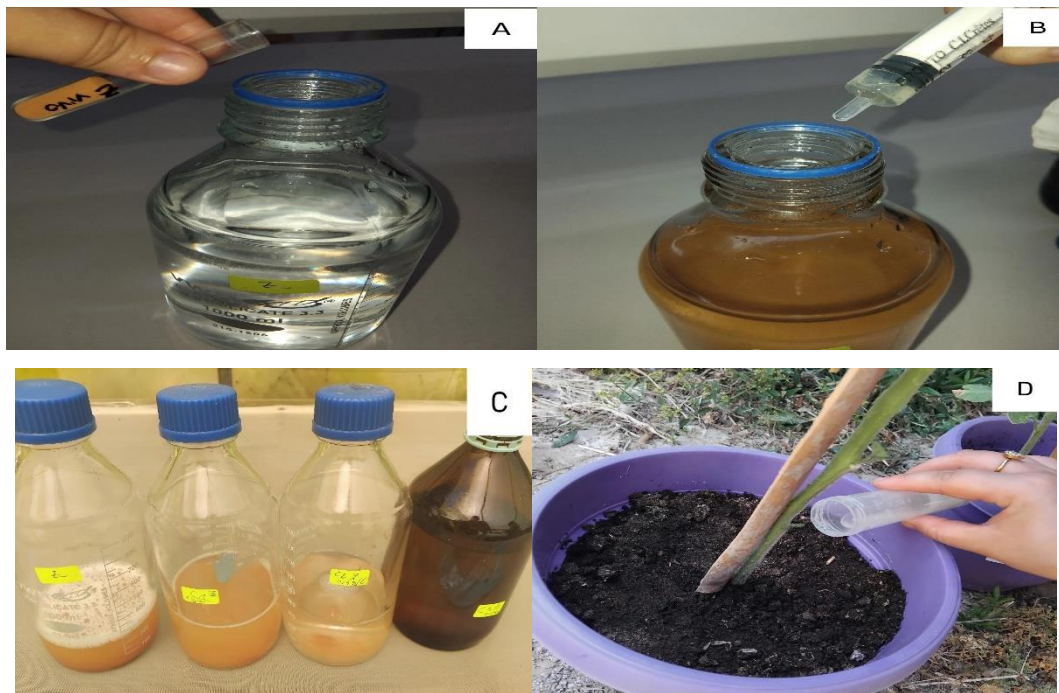


Figure27 : Préparation de la suspension des nanoparticules

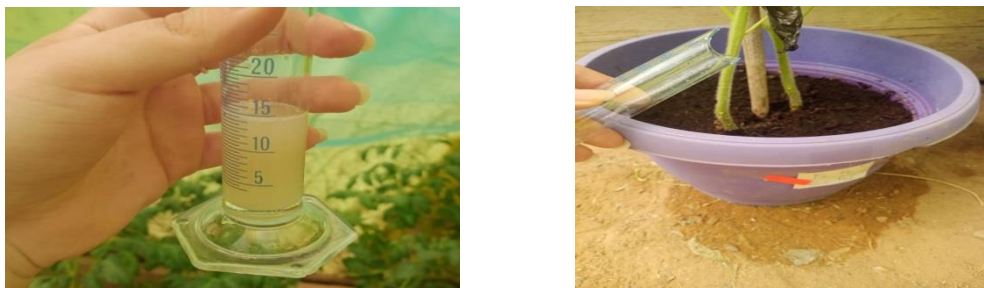


Figure28 : Inoculation par irrigation des isolats de *Fusarium oxysporum* champignons
(Originale, 2026)

d) Indice de maladie

Les résultats ont été exprimés selon le système de notation décrit par HIBAR et al. (2005).

Les plantules sont réparties en cinq classes en fonction de l'importance des symptômes.

Classe 0 : aucun symptôme, plante saine.

Classe 1 : léger jaunissement, légère pourriture.

Classe 2 : jaunissement important des feuilles avec ou sans flétrissement.

Classe 3 : pourriture sévère du pivot des racines secondaires, pourriture importante du collet et brunissement des vaisseaux de la tige.

Classe 4 : plante morte. La réaction moyenne globale des cultivars est quantifiée à l'aide du rapport suivant

$$IM = \frac{1 \times F1 + 2 \times F2 + 3 \times F3 + 4 \times F4 + 5 \times F5}{N}$$

IM : indice de maladie.

ni : nombre de plants à chaque degré de l'échelle

F : nombre de plants pour chaque degré dans l'échelle de notation allant de 1 à 5.

N : nombre totale de plants utilisés.

Selon CABRERA et al., (1987), LECHAPPE et al. (1988), CLULOW et al. (1991), NASSIR et HOPPE (1998), la sensibilité ou la résistance des plants est définie par cet indice.

$$IM = \frac{\sum (n_i \times V_i)}{N}$$

ni = ni : nombre de plants à chaque degré de l'échelle

Vi = valeur du degré (0, 1, 2, 3, 4, 5 pour échelle 0-5)

N = nombre total de plants

Si $IM < 1$ le cultivar est résistant.

Si $1 < IM < 2$ le cultivar est moyennement résistant.

Si $IM \geq 2$ le cultivar est sensible

Chapitre II

Résultats et discussion

Chapitre 2 : Résultat et interprétation

2.1-Identification macroscopique et microscopique des isolats

Les observations macroscopiques des cultures obtenues après l'isolement et la purification de l'agent pathogène ont montré que les isolats étudiés présentent des caractères morphologiques caractéristiques du genre *Fusarium* sp.

L'étude macroscopique des isolats purifiés a révélé des colonies à croissance régulière, de forme circulaire, à marge régulière et nettement définie. Le premier isolat, initialement blanc, a progressivement pris une teinte rosâtre au cours de la croissance. Il présentait un mycélium dense, homogène et cotonneux, avec une zonation concentrique bien visible. Le second isolat, également blanc au début de son développement, a évolué vers une coloration saumon avec l'âge. Son mycélium était moins dense, plus fin et plus dispersé.

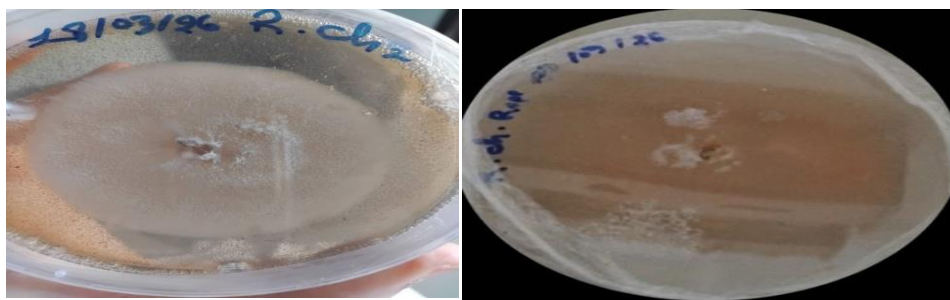


Figure 30: Aspect macroscopique de *Fusarium oxysporum*

A: *Fusarium oxysporum* 1 B: *Fusarium oxysporum* 2 (Original, 2026)

L'observation microscopique a mis en évidence un mycélium, hyalin, cloisonné et ramifié ainsi que des microconidies abondantes, hyalines, unicellulaires, de forme ovale à ellipsoïdale, agglomérées en fausses têtes sur de courtes monophialides.

En revanche, les macroconidies n'ont pas été observées dans les conditions de culture utilisées, ce qui peut s'expliquer par la variabilité morphologique de l'espèce selon le milieu de culture, l'âge de la colonie et les conditions d'incubation et la race physiologique. Des chlamydospores ont également été observées.

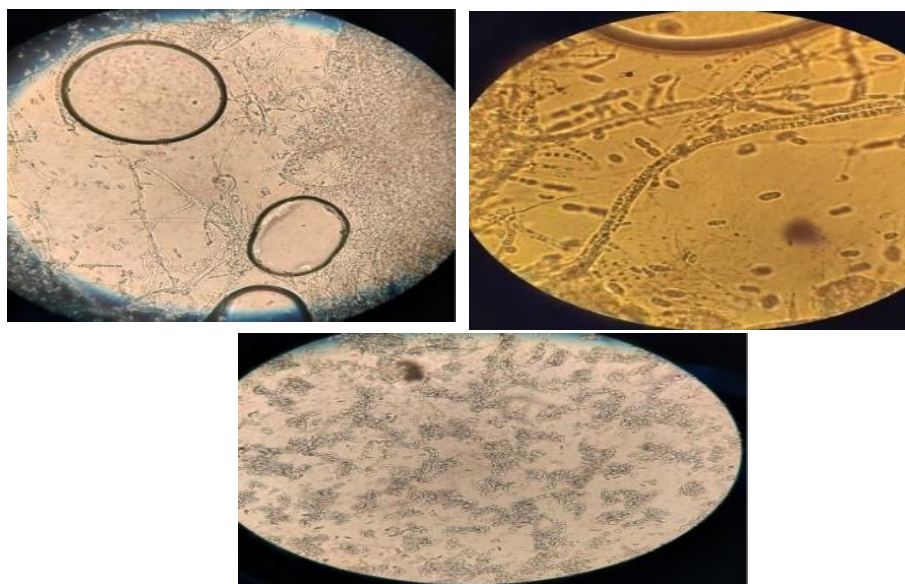


Figure 31: Aspect microscopique de *Fusarium sp* (Originale, 2026).

2.2-Evaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO et Fe₃O₄ vis-à-vis de la croissance des deux isolats de *Fusarium oxysporum*

2.2.1-Evaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO sur la croissance de *F. oxysporum*.

a) -Evaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO sur la croissance de *Fusarium oxysporum* 1:

a) Croissance mycélienne

La Figure 33, représente la croissance de *Fusarium oxysporum* 1 sur 14 jours dans des milieux contenant différentes concentrations de nanoparticules de ZnO (100%, 50%, 25% et 12,5%), en présence d'un témoin négatif (T-) et d'un témoin positif (T+). Durant les 5 premiers jours de l'expérience, une croissance fongique progressive a été observée dans tous les traitements, avec des différences relativement faibles entre les concentrations. Ceci s'explique par la phase d'adaptation nécessaire au champignon pour s'ajuster au milieu nutritif et aux conditions expérimentales avant d'entrer dans la phase de croissance rapide.

À partir du 6 jour, les différences entre les traitements sont devenues plus marquées. Le témoin négatif (T-) a enregistré le taux de croissance le plus élevé, la concentration de croissance passant de 1,4 au 6 jour à 3,8 au 14 jour, ce qui indique que le champignon se développait normalement en l'absence de nanoparticules. Le témoin T+ a également présenté une croissance

similaire à celle du témoin T-, atteignant 3,5 à la fin de l'expérience, ce qui indique que le Tween 20 n'a pas eu d'effet inhibiteur significatif sur la croissance fongique.

Tous les traitements contenant des nanoparticules ont montré une diminution de la croissance par rapport aux témoins, ce qui indique un effet antifongique clair. Le traitement 100% s'est avéré le plus efficace pour inhiber la croissance, celle-ci n'excédant pas 2,1 au jour 14, une valeur significativement inférieure à celle du témoin négatif (3,8). Ceci reflète le fort effet de la concentration 100% sur la limitation du développement fongique.

En revanche, les traitements 50%, 25% et 12,5% ont enregistré des valeurs finales similaires, comprises entre 3,1 et 3,2, indiquant que leur effet inhibiteur était plus faible que celui de 100%. De plus, les courbes de ces traitements sont restées proches les unes des autres, tout au long de l'expérience, suggérant une réponse similaire du champignon à ces concentrations.

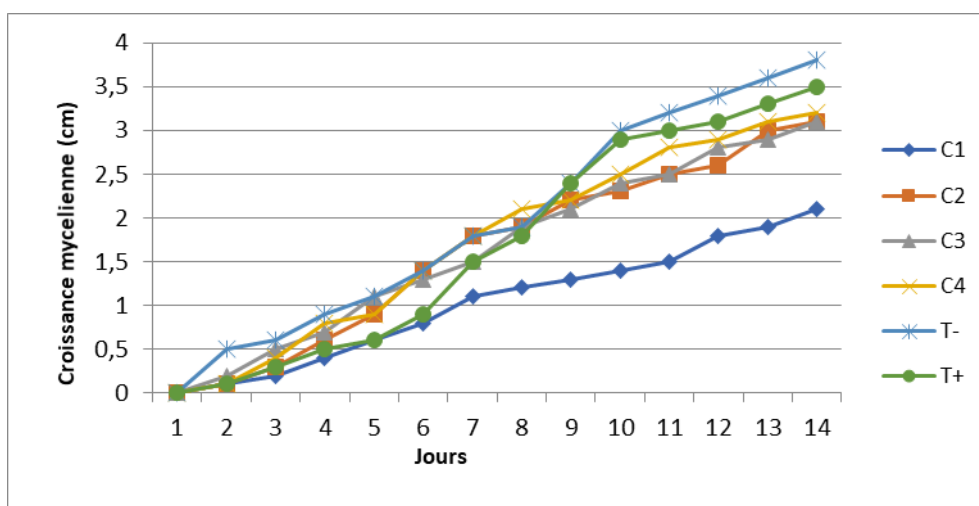


Figure 33: Effet des nanoparticules de ZnO sur la croissance mycélienne de *F. oxysporum 1*

b) Vitesse de la croissance mycélienne :

La Figure 34, représente l'effet des nanoparticules ZnO sur la vitesse de croissance de *Fusarium oxysporum 1*. Elle démontre qu'en absence de ZnO (témoin négatif -T), le champignon atteint la vitesse de croissance maximale de 4,2 cm/j. L'ajout des nanoparticules entraîne une inhibition marquée, réduisant la vitesse de croissance à son minimum, soit 2,4 cm/j à la plus forte concentration (100%). Bien qu'une légère augmentation progressive soit observée avec la diminution des concentrations jusqu'à (12,5%) 3,3 cm/j, les valeurs restent nettement inférieures aux témoins.

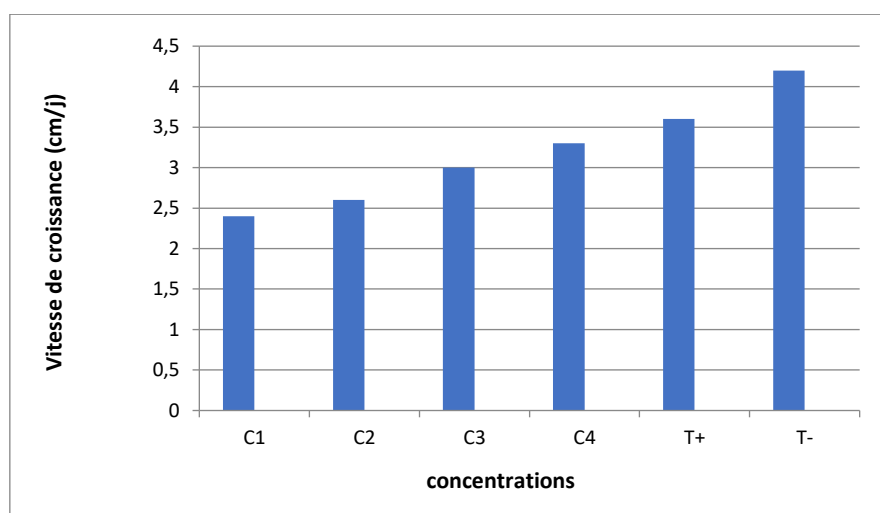


Figure 34 : Effet des nanoparticules de ZnO sur la vitesse de croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* 1

c) Taux d'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* 1

Les résultats expérimentaux présentés sur la Figure 35, montrent l'action des nanoparticules ZnO, sur le taux d'inhibition de la croissance de *Fusarium oxysporum* 1, sous l'effet des quatre concentrations différentes (100%, 50%, 25% et 12,5%) par rapport à un témoin (T). On remarque, une diminution progressive du taux d'inhibition d'une concentration à l'autre : la concentration 100%, enregistre le taux d'inhibition le plus élevé avec un taux de 42,86%, suivie de la concentration 50%, avec un taux de 38,10%, puis de la concentration de 25% avec un taux d'inhibition de 28,57%, et enfin la concentration de 12,5% avec un taux de 21%. Cette tendance décroissante met en évidence une relation directe entre le développement du champignon et l'action des nanoparticules. Et puisque, l'ordre allant de 100%-12,5% représente une diminution de la teneur en matière active (ZnO), on peut en conclure que le pouvoir inhibiteur des nanoparticules ZnO augmente proportionnellement avec leur concentration, confirmant ainsi leur efficacité biologique contre le développement de ce champignon.

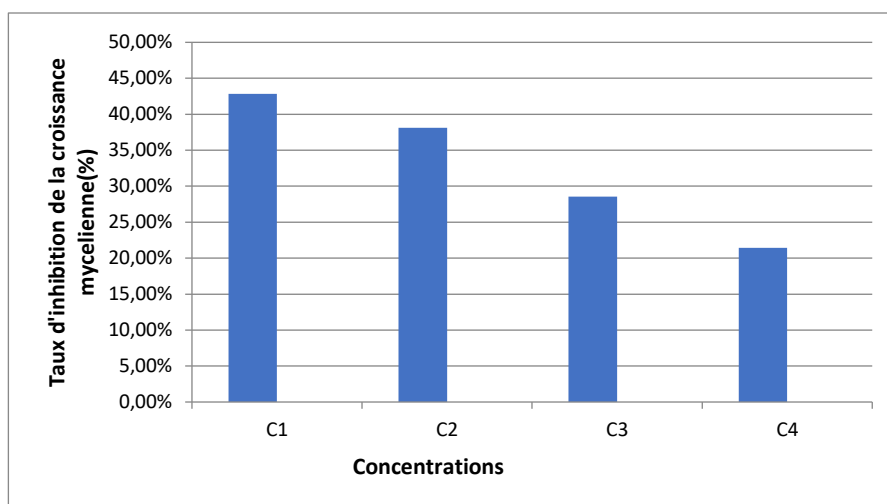


Figure 35 : Effet des nanoparticules de ZnO sur taux d'inhibition de la vitesse de croissance de *Fusarium oxysporum 1*

b) -Evaluation « in vitro » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO sur la croissance de *F. oxysporum 2*:

➤ **Croissance mycélienne**

L'examen du graphique (Figure 37), montre une augmentation progressive et continue de la croissance du *Fusarium oxysporum 2*, sous l'influence des nanoparticules ZnO pendant 14 jours. Cette croissance commence lentement durant les cinq premiers jours (période d'adaptation), puis augmente nettement à partir du 6ème jour pour atteindre son maximum au 14ème jour avec des croissances entre 3,2 cm et 4,2 cm. Nous avons remarqué que Zn n'a montré aucun effet significatif sur la croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum 2*.

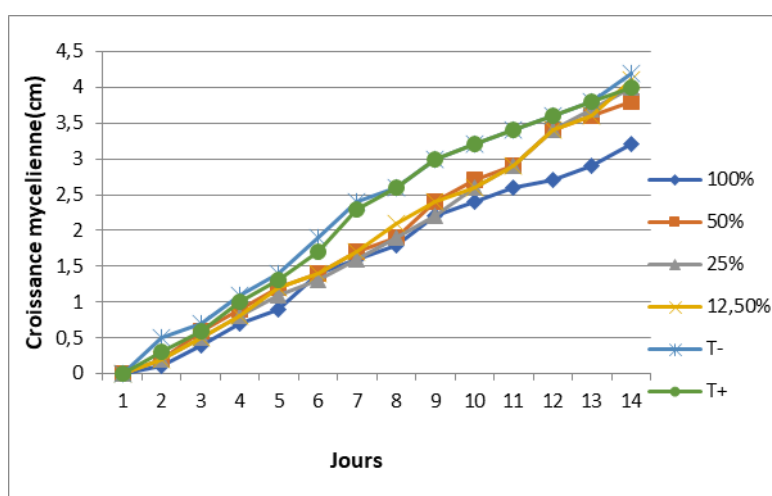


Figure 37 : Effet des nanoparticules de ZnO sur la croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* 2

➤ **Vitesse de la croissance mycélienne**

L'analyse des données expérimentales présentées sur la Figure 38, révèle une nette différence de vitesse de croissance du champignon *Fusarium oxysporum* 2, en présence et en absence de nanoparticules ZnO. Le champignon présente une vitesse de croissance maximale de 4,5 cm, représentée par la barre supérieure dans le milieu témoin négatif (-T), qui correspond à son état naturel sans additifs. En revanche, l'introduction de nanoparticules ZnO dans les milieux (100% à 12,5%) induit une diminution significative de la vitesse de croissance chutant entre 3,1 cm et 3,6 cm. La vitesse de croissance des témoins est significativement supérieure aux 4 traitements.

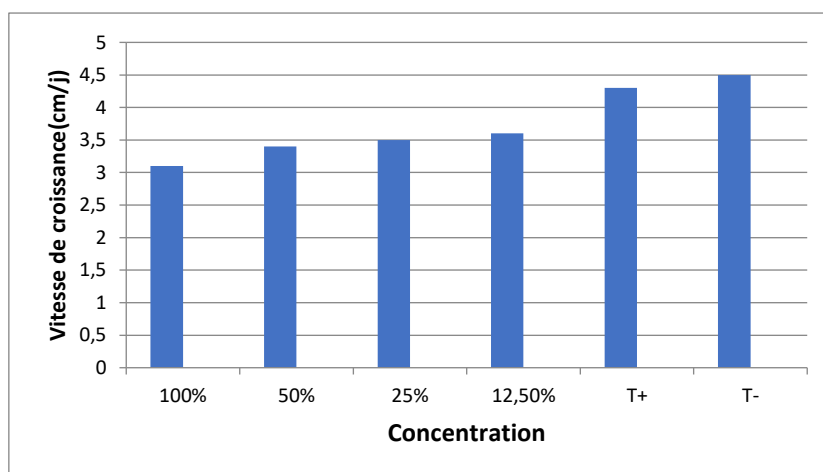


Figure 38 : Effet des nanoparticules de ZnO sur la vitesse de croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* 2

➤ **Taux d'inhibition de la croissance mycélienne**

Les données présentées sur la Figure 39, illustrent l'effet des nanoparticules ZnO sur le taux d'inhibition de la croissance de *Fusarium oxysporum* 2, en fonction des différentes concentrations utilisées (100%, 50%, 25% et 12,5%). En analysant les résultats des quatre concentrations, on observe une relation proportionnelle ; la concentration la plus forte (100%), a enregistré le taux d'inhibition le plus élevé avec 31,11%. Ce taux commence ensuite à diminuer progressivement avec la diminution de la concentration, passant par (50%) avec 24,40%, puis (25%) avec 22,22%, pour atteindre le niveau d'inhibition le plus bas à la

concentration la plus Faible (12,5) avec 20%. Ce déclin indique que l'efficacité antifongique de ces nanoparticules est maximale aux fortes concentrations et qu'elle diminue à mesure que la concentration est faible. Quant au témoin (T), le tableau affiche une valeur d'inhibition élevée identique à C1, ce qui nécessite de vérifier l'exactitude de sa représentation sur le graphique où sa barre apparaît relativement plus basse.

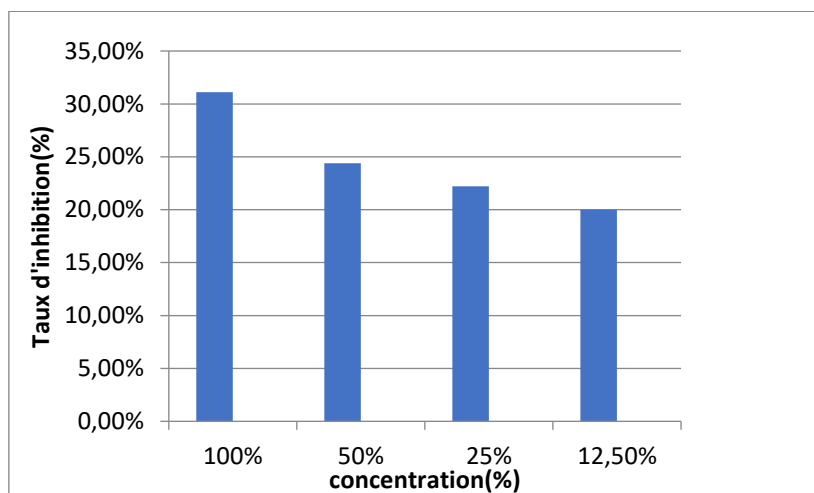


Figure 39: Effet des nanoparticules de ZnO sur le taux d'inhibition de la croissance mycélienne du *Fusarium oxysporum* 2

2.2.2-Evaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de Fe₂O₃ sur la croissance de *F. oxysporum*

a) -Evaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de Fe₂O₃ sur la croissance de *F. oxysporum* 1.

➤ Croissance mycélienne

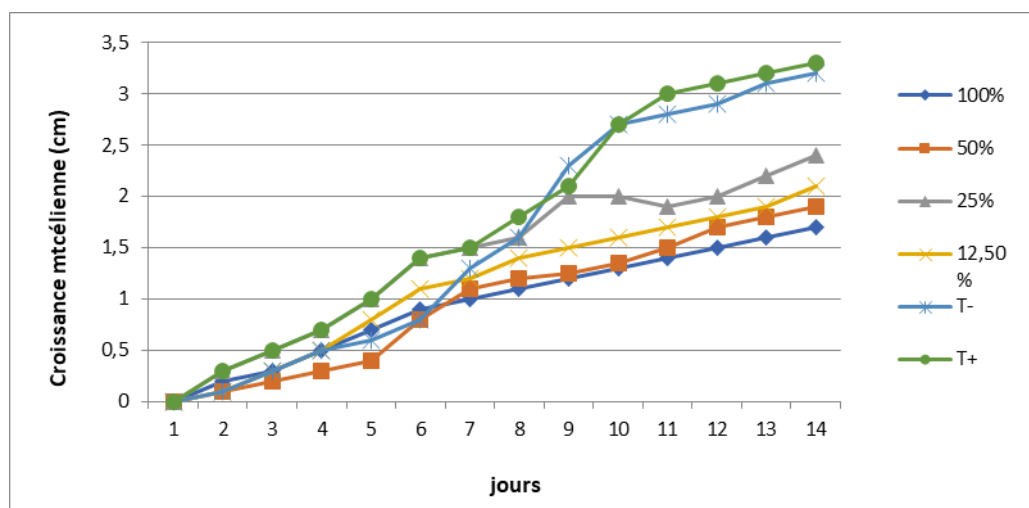


Figure 40 : Effet des nanoparticules de Fe_3O_4 sur la croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* 1

La Figure 40, illustre la croissance de *Fusarium oxysporum* 1, sur 14 jours en présence de différentes concentrations de nanoparticules Fe_3O_4 (100%, 50%, 25%, 12,5%), comparée à celle du témoin négatif (T-) et du témoin contenant du Tween 20 (T+).

Au début de l'expérience (jours 1 à 5), tous les traitements ont montré une augmentation progressive de la croissance, avec de légères différences entre les différentes concentrations.

À partir du 6 jour, les différences entre les traitements se sont accentuées. Les témoins (T-) et (T+) ont enregistré les taux de croissance les plus élevés, atteignant respectivement 3,2 et 3,3 à la fin de l'expérience. Ceci indique le Tween 20 n'a pas eu d'effet inhibiteur significatif.

Les traitements contenant des nanoparticules ont montré des diminutions de croissance plus ou moins importantes par rapport aux témoins. Le traitement 100% a enregistré la plus faible valeur de croissance finale (1,7 cm) au jour 14, ce qui indique son efficacité à inhiber la croissance fongique. Le traitement 50% a également montré un effet inhibiteur significatif, avec une valeur de croissance finale de 1,9 cm.

En revanche, les traitements 25% et 12,5% ont présenté une croissance relativement plus importante, atteignant des valeurs finales de 2,4 et 2,1 respectivement, démontrant ainsi que leur effet antifongique était plus faible que celui des traitements 100% et 50%.

Globalement, tous les traitements contenant des nanoparticules ont entraîné une réduction de la croissance fongique par rapport aux témoins, confirmant ainsi l'activité antifongique des nanoparticules Fe_3O_4

➤ **Vitesse de croissance mycélienne**

La Figure 41, illustre l'effet des nanoparticules de Fe_3O_4 , à réduire la vitesse de croissance de *Fusarium oxysporum* 1. On observe une croissance rapide dans le milieu exempt de nanoparticules (témoin -T et T+), atteignant respectivement 4,2 cm/j et 4cm/j. Cependant, la présence des nanoparticules inhibe brutalement cette croissance, le taux chutant à un minimum de seulement 2,4 cm/j à la concentration 100%. Lorsque les concentrations diminuent progressivement jusqu'à 12,5%, le champignon retrouve lentement une partie de sa vigueur, sa vitesse de croissance qui atteint 3,3 cm/j. Néanmoins, il reste incapable de dépasser le seuil du témoin positif (+T) de 4 cm/j.

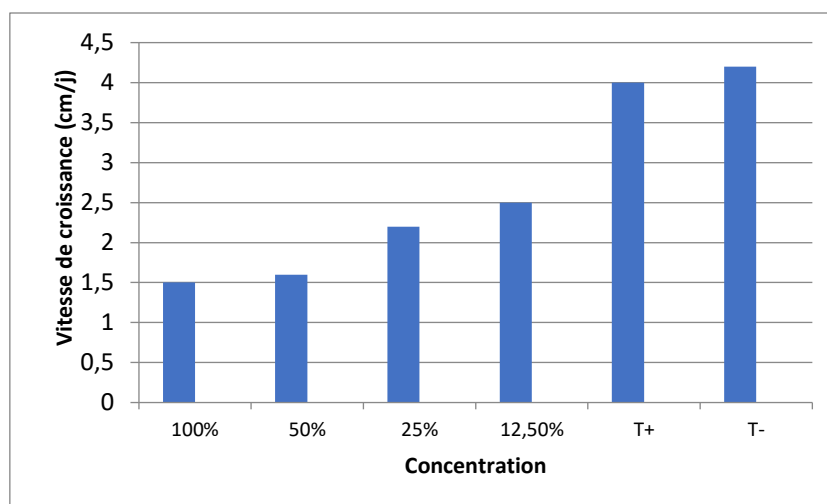


Figure 41 : Effet des nanoparticules de Fe_3O_4 sur la vitesse de croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* 1

➤ **Taux d'inhibition de la croissance mycélienne**

La Figure 42, montre l'efficacité inhibitrice des nanoparticules Fe_3O_4 sur le *F. oxysporum* à différentes concentrations (100%, 50%, 25%, 12,5%) par rapport au témoin (T). Les résultats révèlent une corrélation directe et nette entre la concentration de ces particules et le taux d'inhibition (effet dose-dépendant). Le taux d'inhibition le plus élevé a été enregistré à la concentration la plus élevée (100%), atteignant 64,29 %. Ce taux diminue ensuite progressivement avec l'augmentation de la dilution de la solution pour atteindre 61,90 % à la concentration 50%, puis 47,62 % à la concentration 25%, et enfin 40,48 % à la concentration la plus faible (12,5%).

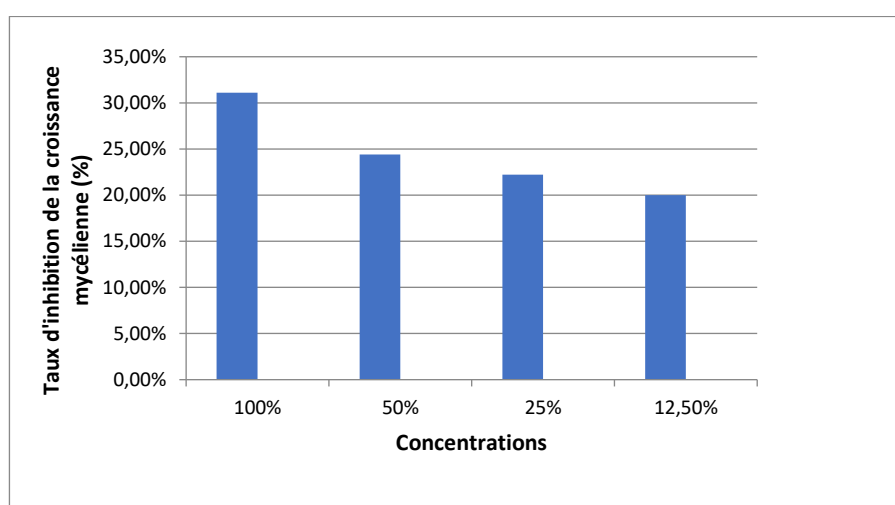


Figure 42 : Effet des nanoparticules de Fe_3O_4 sur le taux d'inhibition de la croissance mycélienne du *Fusarium oxysporum* 1

b) -Évaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de Fe_2O_3 sur la croissance de *Fusarium oxysporum* 2 :

➤ **Croissance mycélienne**

La Figure 43, illustre la croissance *Fusarium oxysporum* 2, au cours du temps (en jours) sous l'influence de nanoparticules Fe_3O_4 pendant une période d'incubation de 14 jours.

L'examen du graphique révèle une augmentation progressive et continue de la croissance du champignon au fil des jours, et ce, pour l'ensemble des traitements représentant l'expérience. Cette croissance débute relativement lentement durant les premiers jours (du jour 1 au jour 5), correspondant à la période d'adaptation du champignon au milieu contenant les nanoparticules. À partir du jour 6, la croissance s'accélère nettement jusqu'à la fin de l'expérience, au jour 14, où elle atteint son maximum, avec des concentrations comprises entre 3,2 cm et 4,2 cm.

Nous avons remarqué qu'à l'instar de ZnO , le Fe_2O_3 n'a montré aucun effet significatif sur la croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* 2.

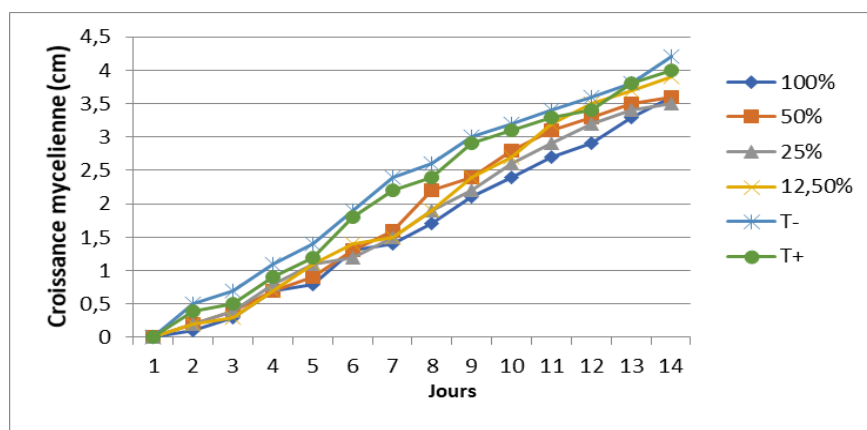


Figure 43: Effet des nanoparticules de Fe_3O_4 sur la croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* 2

➤ **Vitesse de croissance**

L'examen des données de la Figure 44, montre que *Fusarium oxysporum* 2, atteint son développement maximal (4,5 cm) en l'absence totale de nanoparticules Fe_2O_3 . L'incorporation de cette substance au milieu de culture de fortes concentrations (100%), exerce un effet inhibiteur marqué qui diminue la croissance du champignon à 3,1 cm. Cependant, de manière paradoxale, la diminution progressive de la concentration de 100% à 12,5% permet au champignon de s'adapter, de résister et de reprendre son rythme de croissance pour atteindre 4,2 cm. En conclusion, les nanoparticules Fe_3O_4 ont un effet inhibiteur relativement faible qui diminue avec la concentration.

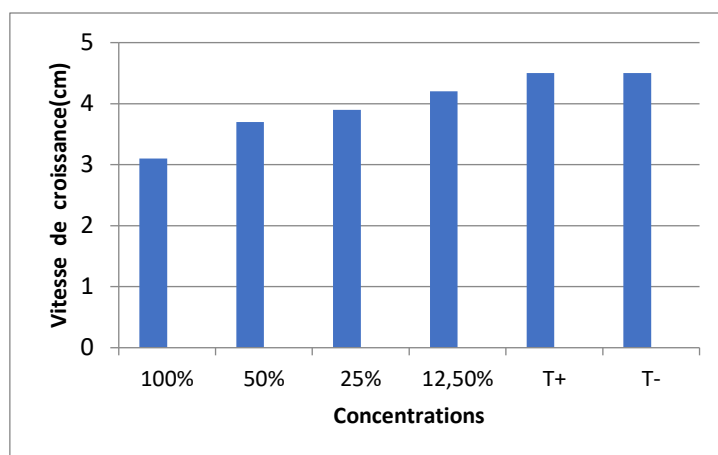


Figure 44 : Effet des nanoparticules de Fe_3O_4 sur la vitesse de croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* 2

➤ Taux d'inhibition de la croissance mycélienne

La Figure 45, illustrent l'effet de Fe_3O_4 sur le champignon sur *F.oxysporum*, montrant une relation inverse très nette entre l'augmentation de la concentration et le taux d'inhibition (En effet, la concentration la plus haute (100%) a enregistré le taux d'inhibition le plus élevé avec 31,11%, puis l'efficacité chute de manière progressive et marquée avec la diminution des concentrations, atteignant 17,78% pour (50%), puis 13,33% pour (25%), jusqu'à son niveau le plus bas à la concentration la plus faible (12,5%) avec seulement 6,67%. Ce déclin prononcé confirme que le pouvoir antifongique de ces nanoparticules (Fe_3O_4) faiblit fortement à mesure que leur concentration diminue.

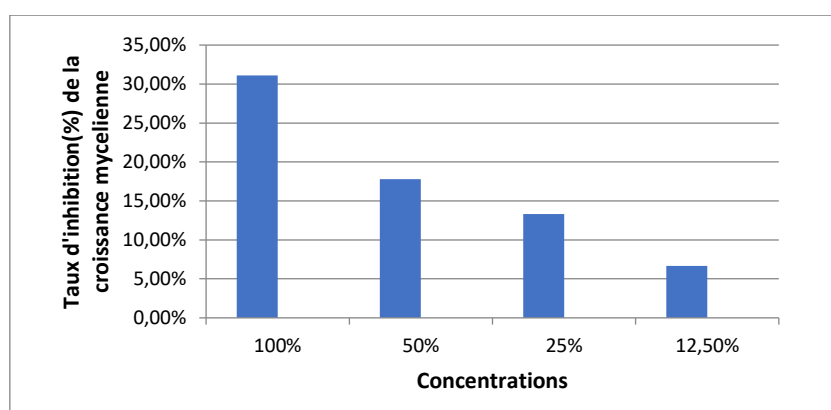


Figure 45 : Effet des nanoparticules de Fe_3O_4 sur le taux d'inhibition de la croissance mycélienne du *Fusarium oxysporum* 2

2.3- Evaluation « in vitro » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO sur de la sporulation de *Fusarium oxysporum*

2.3.1-Evaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO sur de la sporulation de *Fusarium oxysporum*

a) -Evaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO sur de la sporulation de *Fusarium oxysporum* 1 :

La Figure 46, montre que les traitements contenant les nanoparticules aux concentrations :100%, 50%, 25% et 12,5%), ont permis de réduire la de *F. oxysporum* 1, par rapport aux témoins (T+ et T-).

Le traitement 100% a présenté le nombre de conidies le plus faible ($3,5 \times 10^7$ conidie), indiquant la plus forte activité inhibitrice. En revanche, le témoin négatif (T-) a enregistré la valeur la plus élevée ($7,3 \times 10^7$ spores). Une augmentation progressive du nombre de conidies a été observée en passant de la concentration 100% à la concentration 12,5%, suggérant une diminution de l'effet inhibiteur des nanoparticules. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité antifongique des nanoparticules vis-à-vis du champignon étudié.

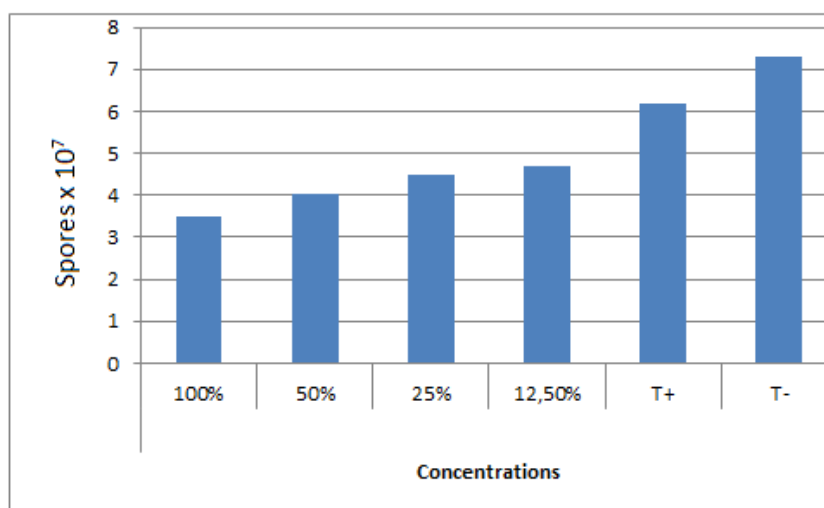


Figure 46 : Effet des différentes doses des nanoparticules de ZnO sur la sporulation de *Fusarium oxysporum* 1

b) -Évaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO sur la sporulation de *Fusarium oxysporum* 2.

La Figure 47, révèle que les traitements contenant les nanoparticules aux concentrations étudiés (100%, 50%, 25% et 12,5%) ont permis de réduire la croissance du champignon *F. oxysporum* 2, par rapport aux témoins (T+ et T-). Parmi ces traitements, la concentration à 100% a présenté le plus faible nombre de conidies, avec $7,8 \times 10^7$ conidies, traduisant une activité inhibitrice marquée. À l'inverse, le témoin négatif (T-) a enregistré la croissance la plus élevée, avec $11,6$

$\times 10^7$ conidies. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité antifongique des nanoparticules vis-à-vis de ce phytopathogène.

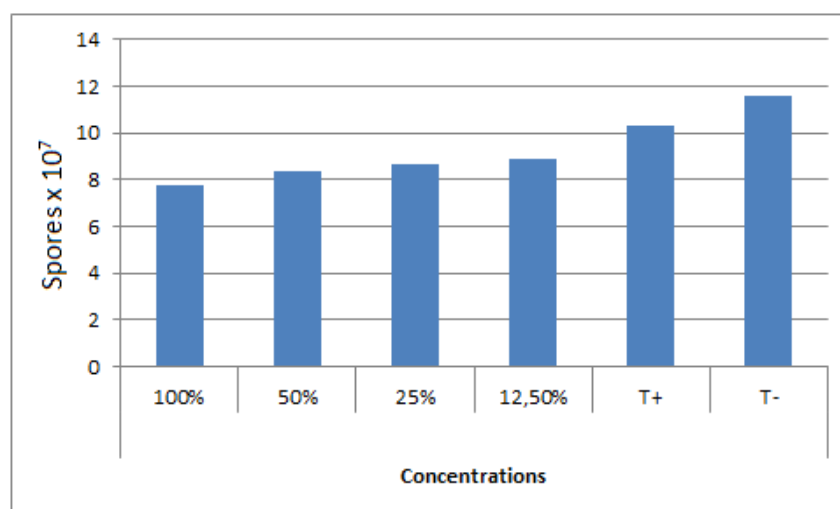


Figure 47 : Effet des différentes doses des nanoparticules ZnO sur la sporulation de *Fusarium oxysporum* 2 .

2.3.2-Évaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de Fe₃O₄ sur la sporulation de *Fusarium oxysporum*

2.3.2.1-Évaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de Fe₃O₄ sur la sporulation de *Fusarium oxysporum* 1

Les résultats représentés sur la Figure 48, présentent la sporulation de *F. oxysporum* 1 en fonction des doses des nanoparticules Fe₃O₄. Elle montre que le traitement réduit le nombre de spores à toutes les concentrations testées, avec un effet plus marqué aux fortes concentrations, tandis que les témoins présentent les sporulations les plus élevées. En effet, On observe une augmentation progressive du nombre de spores lorsque la concentration diminue de 100% à 12,5%, suggérant une relation dose-effet où la réduction de la dose s'accompagne d'une diminution de l'efficacité inhibitrice. Le témoin positif (T+) présente une sporulation nettement supérieure à celle de toutes les concentrations testées, et le témoin négatif (T-) montre la sporulation maximale, ce qui confirme que les nanoparticules de Fe₃O₄ provoquent un effet inhibiteur de la sporulation de *F. oxysporum*1.

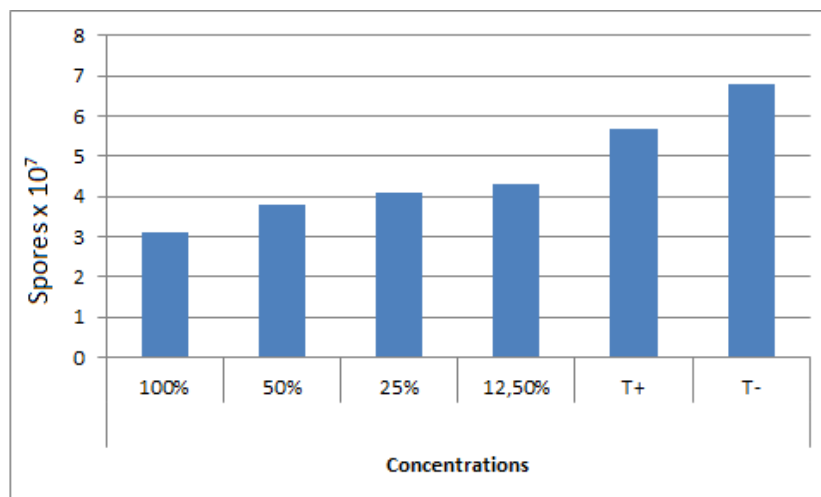


Figure 48 : Effet des différentes doses des nanoparticules Fe₃O₄ sur la sporulation de *Fusarium oxysporum* 1 .

2.3.2.2-Évaluation « *in vitro* » de l'activité antifongique des nanoparticules de Fe₃O₄ sur la sporulation de *Fusarium oxysporum* 2:

La Figure 49, dévoile la sporulation de *F. oxysporum* 2, sous l'effet des nanoparticules Fe₃O₄. Comme pour le champignon précédent les nanoparticules Fe₃O₄, diminuent nettement la sporulation de toutes les doses par rapport aux témoins, avec un effet plus marqué aux fortes concentrations, tandis que T- a favorisé une sporulation maximale.

On observe une légère augmentation de la sporulation lorsque la concentration diminue (de 6,7 à 8,4 ×10⁷), ce qui suggère une tendance dose-effet : la réduction de la concentration s'accompagne d'une perte partielle d'efficacité. Les témoins présentent des valeurs plus élevées, en particulier le témoin négatif (11,6 ×10⁷).

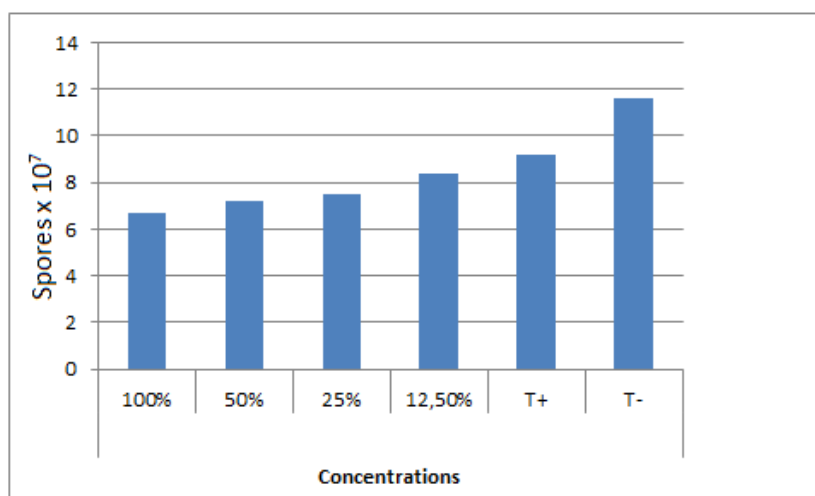


Figure 49 : Effet des différentes doses des nanoparticules Fe₃O₄ sur la sporulation de *Fusarium oxysporum* 2.

2.3- Evaluation « *in vivo* » de l'activité antifongique des nanoparticules de ZnO et Fe₃O₄ vis-à-vis des deux isolats de *Fusarium oxysporum*

a) Semaine 1

Les résultats de la première semaine sont représentés sur la Figure 50. Cette semaine a marqué le début de l'infection, où les symptômes de la fusariose pour les deux isolats inoculés commencent à peine à apparaître. Le témoin inoculé non traité (T+) affiche déjà un indice de 0,7.

Un effet dose-réponse très net est observé. À 100% et 50% de concentration, les formulations bloquent presque totalement la maladie (indice de 0,1 à 0,2). Dès qu'on dilue à 12,5%, la protection diminue et l'indice monte jusqu'à 0,5–0,7, rejoignant la sévérité du témoin positif (T+).

b) Semaine 2 :

La deuxième semaine du traitement (Figure 51), peut être décrite comme phase de progression de la maladie. En effet on remarque que la maladie causée par les deux isolats a gagné du terrain, le témoin positif (T+) explose à 2,6. Le témoin de référence (*Trichoderma* sp.) commence à montrer ses limites avec un indice de 1.

Les résultats obtenus montrent également qu'en comparant l'effet des deux nanoparticules (ZnO et Fe₃O₄), une différence nette apparaît. Les traitements par les nanoparticules de Fe₃O₄ maintiennent une excellente protection à 100% de concentration (indices de 0,6 et 0,7). En revanche, les nanoparticules de ZnO, semblent moins performant : à 100%, l'indice monte à 0,8 pour la combinaison (*F. oxysporum* 1, ZnO) et grimpe carrément à 1,6 pour la combinaison (*F. oxysporum* 2, Zn).

Figure 51 : Effet des différentes doses des nanoparticules (Fe₃O₄ et ZnO) et *Trichoderma* sp, sur la sévérité de la fusariose après la deuxième semaine de traitements

c) Semaine 3 :

Pendant la troisième semaine la maladie atteint son maximum (pic de l'infection), chez le témoin non traité (T+ = 3,2 à 3,5). Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 52. Ils démontrent que le lot composé par l'isolat *F.oxysporum* 2, traité par Fe₃O₄, s'est complètement stabilisé par rapport à la deuxième semaine. A 100% ce traitement (*F.oxysporum* 2, Fe₃O₄)

maintient l'indice le plus bas (0,7), offrant une protection maximale contre le flétrissement. Pour ce qui des traitements réalisés sur *F. oxysporum* 1. Le traitement à base des nanoparticules de Fe₃O₄, s'est révélé protecteur (indice de maladie=1 à la concentration de 100%). Alors que celui à base de ZnO laisse la maladie se développer fortement (indice de maladie =2,6 à la concentration de 100%). La dernière concentration à 12,5% des nanoparticules testés n'offrent aucune protection. Les indices (2,8 à 3,6) égalent ou dépassent le témoin positif (T+), ce qui montre que la concentration en principes actifs est devenue trop faible pour induire une résistance efficace. Nous avons également relevé que le traitement au *Trichoderma* sp., offre une protection intermédiaire avec un indice de maladie de 1,43.

Chapitre III : Discussion

Chapitre III : Discussion :

Les résultats de cette étude ont montré que les nanoparticules Fe_3O_4 et de ZnO possèdent une activité antifongique contre les deux isolats de *Fusarium oxysporum*. Cependant, les nanoparticules de fer se sont révélées plus efficaces que les nanoparticules de zinc pour inhiber la croissance mycélienne, réduire le taux de croissance et diminuer la production de spores. Cette différence est attribuée aux propriétés physico-chimiques distinctes des nanoparticules de fer, qui présentent une plus grande capacité d'interaction avec les cellules fongiques et stimulent la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS). Ceci induit un stress oxydatif qui endommage les membranes cellulaires, les protéines et les acides nucléiques, entraînant une réduction de la croissance fongique et une diminution de l'activité biologique (LEMIRE et *al.*, 2013 ; KHAN et *al.*, 2019).

Les nanoparticules de zinc ont également présenté un effet inhibiteur sur les champignons, attribué à leur capacité à libérer des ions zinc (Zn^{2+}) qui interfèrent avec l'activité de nombreuses enzymes et protéines au sein de la cellule fongique. De plus, elles contribuent à la formation d'espèces réactives de l'oxygène, qui perturbent les processus métaboliques et inhibent la croissance des hyphes fongiques. Cependant, leur efficacité était inférieure à celle des nanoparticules de fer, probablement en raison de différences de vitesse de libération des ions, de taille des particules ou de degré d'agrégation dans le milieu – des facteurs qui influencent directement leur activité antifongique (DIMKPA & BINDRABAN, 2016 ; RAGHUNATH & PERUMAL, 2017).

Les résultats ont également montré que l'inhibition de croissance la plus importante était observée à la concentration 100%, tandis que l'activité diminuait à certaines concentrations. Ceci peut s'expliquer par l'agrégation accrue des nanoparticules aux concentrations plus élevées, ce qui réduit leur surface effective et limite leur capacité à entrer en contact avec les cellules fongiques et à pénétrer la paroi cellulaire, diminuant ainsi leur efficacité biologique (DIMKPA & BINDRABAN, 2016).

L'étude a également révélé une différence de réponse des deux isolats de *F. oxysporum* aux nanoparticules. L'isolat *F. oxysporum* 1, s'est avéré plus sensible aux particules de fer et de zinc que l'isolat *F. oxysporum* 2. Cette différence est probablement due à des variations génétiques et physiologiques entre les isolats, notamment au niveau de la structure de leur paroi cellulaire et de l'efficacité de leurs systèmes de défense antioxydants, ce qui influence leur tolérance aux nanoparticules (LEMIRE et *al.*, 2013).

Les résultats ont également montré que les nanoparticules de fer et de zinc inhibaient non seulement la croissance mycélienne, mais réduisaient aussi significativement la production de

conidies, démontrant ainsi leur impact sur la capacité de reproduction du champignon. Cette observation est très importante car la réduction de la sporulation diminue les risques de dissémination du pathogène et de nouvelles infections, renforçant ainsi le potentiel des nanoparticules comme outil efficace de lutte contre les maladies de flétrissement causées par *Fusarium oxysporum*.

Globalement, les résultats de l'étude indiquent que les nanoparticules de fer sont plus efficaces que les nanoparticules de zinc pour inhiber la croissance de *Fusarium oxysporum*., ce qui en fait des candidats prometteurs pour le développement de méthodes de lutte alternatives aux pesticides chimiques conventionnels. Toutefois, des études complémentaires sont nécessaires pour évaluer leur efficacité en conditions réelles et pour étudier leur innocuité environnementale ainsi que leurs effets sur les plantes et les organismes non ciblés.

L'étude « in vivo » a mis en évidence une réduction de la sévérité de la fusariose chez les plants de tomate traités par des nanoparticules de ZnO et de Fe₂O₃. Toutefois, l'efficacité des traitements a varié selon la nature des nanoparticules, la concentration appliquée et la durée d'observation.

Au cours de la première semaine, les traitements à fortes concentrations (100% et 50%) ont présenté les indices de sévérité les plus faibles, alors que les concentrations moins importantes (25% et 12,5%) ont entraîné une augmentation progressive de la gravité de la maladie. Les nanoparticules de zinc se sont montrées plus efficaces que celles de fer pour limiter l'installation initiale de *F. oxysporum*. Cette observation est en accord avec les travaux de HE et *al.* (2011), qui ont montré que les nanoparticules de ZnO inhibent efficacement la croissance des champignons phytopathogènes grâce à plusieurs mécanismes : la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), l'altération de la membrane plasmique, les dommages à l'ADN et l'inhibition des systèmes enzymatiques essentiels. De même, SIRELKHATIM et *al.* (2015) rapportent que les nanoparticules de ZnO possèdent une activité antifongique importante contre de nombreuses espèces de champignons phytopathogènes.

Au cours de la **deuxième semaine**, une augmentation générale de la sévérité de la maladie a été observée dans l'ensemble des traitements, traduisant la progression normale de l'infection vasculaire provoquée par *Fusarium oxysporum*. Malgré cette progression, les nanoparticules de zinc ont conservé des indices de sévérité généralement inférieurs à ceux obtenus avec les nanoparticules de Fe₃O₄ dans plusieurs traitements, indiquant une meilleure efficacité à ce stade de l'infection.

Ces résultats concordent les observations de DI PIETRO et *al.* (2003), qui ont montré que *Fusarium oxysporum* colonise progressivement le système vasculaire de la plante en

produisant des enzymes de dégradation des parois cellulaires et des toxines facilitant son développement. Selon AGRIOS (2005), la progression de la maladie devient plus rapide après la colonisation du xylème, ce qui explique l'augmentation de l'indice de sévérité au fil des semaines.

Les résultats de la troisième semaine montrent cependant une évolution analogue. Les traitements à base de nanoparticules de fer ont présenté des indices de sévérité plus faibles que les traitements au zinc, notamment aux fortes concentrations (100% et 50%), démontrant une meilleure efficacité du fer à long terme pour ralentir la progression de la maladie. Cette amélioration peut être attribuée au rôle physiologique essentiel du fer dans le métabolisme végétal. Le fer intervient dans la synthèse de la chlorophylle, le transport des électrons, l'activité de nombreuses enzymes antioxydantes ainsi que dans les mécanismes de défense de la plante. RUI et *al.* (2016) ont montré que les nanoparticules de fer améliorent la nutrition minérale, renforcent les systèmes antioxydants et augmentent la résistance des plantes aux stress biotiques. De même, GHAFARIYAN et *al.* (2013) ont observé que les nanoparticules de fer stimulent la croissance végétative et améliorent l'état physiologique des plantes soumises à différents stress.

L'absence totale de symptômes dans le témoin négatif durant toute l'expérimentation confirme que les symptômes observés sont exclusivement liés à l'inoculation de *F. oxysporum*, tandis que les valeurs élevées enregistrées chez le témoin positif traduisent l'importante virulence de ces isolats phytopathogènes en absence de traitement. Ce résultat est conforme aux descriptions de LESLIE et SUMMERELL (2006), qui indiquent que *Fusarium oxysporum* est un champignon tellurique capable de survivre plusieurs années dans le sol grâce à ses chlamydospores et d'envahir rapidement le système vasculaire des plantes sensibles.

Dans l'ensemble, cette étude confirme que les nanoparticules métalliques constituent une stratégie prometteuse pour la lutte contre la fusariose de la tomate. Les nanoparticules de zinc apparaissent particulièrement efficaces durant les premiers stades de l'infection, probablement grâce à leur activité antifongique directe, tandis que les nanoparticules de fer semblent favoriser davantage les mécanismes de défense et la tolérance de la plante au cours des phases avancées de la maladie. Néanmoins, les résultats montrent également que l'efficacité dépend fortement de la concentration appliquée, les fortes doses étant généralement plus performantes que les concentrations faibles, ce qui souligne l'importance de déterminer une concentration optimale avant toute application en conditions agricoles.

Conclusion

Conclusion générale

Dans un contexte où l'optimisation des performances agricoles et la réduction de l'usage des produits phytosanitaires chimiques constituent des enjeux majeurs, cette étude a permis d'évaluer l'activité antifongique des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO) et des nanoparticules d'oxyde de fer (Fe₃O₄) vis-à-vis de deux isolats de *Fusarium oxysporum*, agents responsables de maladies importantes chez la tomate.

Les essais *in vitro* ont démontré que les deux types de nanoparticules possèdent une activité antifongique significative, bien que leur efficacité varie selon le type de nanoparticule, la concentration appliquée et l'isolat fongique étudié. Les nanoparticules de ZnO ont montré un effet inhibiteur marqué sur le *F. oxysporum* 1, notamment à la concentration de 100%, où la croissance mycélienne a été fortement réduite, avec une vitesse de croissance limitée à 2,4 cm contre 4,2 cm pour le témoin. De même, les nanoparticules de Fe₃O₄ ont présenté une activité antifongique importante, particulièrement contre *Fusarium oxysporum* 1, avec un taux maximal d'inhibition de la croissance mycélienne atteignant 64,29 % à la concentration 100%.

Concernant le *F. oxysporum* 2, les résultats indiquent également une réduction de la vitesse de croissance mycélienne en présence des nanoparticules, bien que l'effet inhibiteur soit moins prononcé que celui observé pour le *F. oxysporum* 1. Les nanoparticules de ZnO ont permis d'atteindre un taux d'inhibition maximal de 31,11 %, tandis que les nanoparticules de Fe ont montré une efficacité plus modérée. Les analyses de la sporulation confirment ces observations, les traitements avec les nanoparticules ont réduit significativement la production de conidies chez les deux isolats, ce qui témoigne de leur capacité à limiter le potentiel infectieux du pathogène.

Les résultats obtenus mettent également en évidence que la concentration 100% représente la dose optimale pour les deux nanoparticules. À des concentrations moins élevées, une diminution progressive de l'activité inhibitrice a été observée.

Dans l'ensemble, cette étude démontre que les nanoparticules de ZnO et de Fe₃O₄ constituent des alternatives prometteuses aux fongicides chimiques conventionnels. Leur capacité à inhiber la croissance mycélienne et la sporulation de *F. oxysporum*, ouvre des perspectives intéressantes pour le développement de stratégies de lutte intégrée plus durables et respectueuses de l'environnement.

L'étude « *in vivo* » a démontré que les nanoparticules de Fe₃O₄ ont montré un effet protecteur durable contre les deux isolats de *F. oxysporum*, en limitant fortement l'évolution de la fusariose au cours des semaines. Leur efficacité augmente avec la concentration, les traitements à 100% et 50% étant les plus performants. À l'inverse, les nanoparticules de ZnO perdent

progressivement leur efficacité, tandis que les concentrations de 25% et 12,5% se révèlent insuffisantes. Comparées à *Trichoderma* sp., les nanoparticules de Fe₃O₄ présentent donc le meilleur effet préventif et constituent une solution prometteuse pour la protection de la tomate contre la fusariose. Toutefois, des études complémentaires, réalisées en conditions de serre et de plein champ, demeurent nécessaires afin de confirmer leur efficacité, d'optimiser les doses d'application et d'évaluer leurs effets à long terme sur les plantes, les sols et les microorganismes bénéfiques avant leur utilisation à grande échelle.

Références bibliographiques

- Agrios G.N. (2005), Plant Pathology.
- Agrios, G. N. (2005). Plant Pathology (5th ed.). Elsevier Academic Press, Burlington, USA.
- Agrios, G. N. (2005). Plant Pathology (5th ed.). Elsevier Academic Press.
- Alabouvette, C., Lemanceau, P., & Steinberg, C. (1986). Biological control of Fusarium wilts by nonpathogenic Fusarium. In: Fusarium: Diseases, Biology and Taxonomy. Academic Press.
- Alexander, L. J., & Tucker, C. M. (1945). Physiologic specialization in the tomato wilt fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. Journal of Agricultural Research, 70, 303–313.
- Beckman, C. H. (1987). The Nature of Wilt Diseases of Plants. APS Press, St. Paul, Minnesota.
- Beckman, C. H. (1987). The Nature of Wilt Diseases of Plants. APS Press, St. Paul, Minnesota, USA.
- Beckman, C. H. (1987). The Nature of Wilt Diseases of Plants. APS Press.
- Beckman, C. H., & Roberts, E. M. (1995). On the nature and genetic basis for resistance and tolerance to fungal wilt diseases of plants. Advances in Botanical Research.
- Blancard D. (1997), Tomato Diseases: Identification, Biology and Control.
- Blancard, D. (1997). Maladies de la tomate : Identifier, connaître, maîtriser. INRA Editions, Paris, France.
- Booth C. (1971), The Genus *Fusarium*.
- Booth, C. (1971). The Genus *Fusarium*. Commonwealth Mycological Institute, Kew, Surrey, England.
- Botton B. et al. (1985), Moisissures utiles et nuisibles: Importance industrielle.
- Botton, B., Breton, A., Fevre, M., Gauthier, S., Guy, P., Larpent, J. P., Reymond, P., Sanglier, J. J., & Vayssier, Y. (1985). Moisissures utiles et nuisibles : Importance industrielle. Masson, Paris.
- Burgess L.W. et al. (1988), Laboratory Manual for *Fusarium* Research.
- Burgess, L. W., Summerell, B. A., Bullock, S., Gott, K. P., & Backhouse, D. (1988). Laboratory Manual for *Fusarium* Research. University of Sydney, Australia.
- Chaux C. & Foury C. (1994), Productions légumières, Tome III.
- Chaux, C., & Foury, C. (1994). Productions légumières (Tome III). Lavoisier Tec & Doc, Paris.
- Corbaz R. (1990), Principles of Plant Pathology.
- Corbaz, R. (1990). Principes de phytopathologie et de lutte contre les maladies des plantes. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne.
- Davis, R. M., Kimble, K. A., & Farrar, J. J. (1988). A third race of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* identified in California. Plant Disease, 72, 453.
- Di Pietro, A., A., et al. (2003). *Fusarium oxysporum*: Exploring the molecular arsenal of a vascular wilt fungus. Molecular Plant Pathology, 4, 315–325.
- Di Pietro, A., Madrid, M. P., Caracuel, Z., Delgado-Jarana, J., & Roncero, M. I. G. (2003). *Fusarium oxysporum*: Exploring the molecular arsenal of a vascular wilt fungus. Molecular Plant Pathology, 4(5), 315–325.
- Dimkpa, C. O., C. O., & Bindraban, P. S. (2018). Nanofertilizers: New products for the industry? Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66, 6462–6473.

- Dommergues, Y., Mangenot, F., & collaborateurs. (1970). Écologie microbienne du sol. Masson, Paris.
- Dupont F. & Guignard J.L. (2012), Botanique: Systématique moléculaire.
- Dupont, F., & Guignard, J. L. (2012). Botanique : Systématique moléculaire (14e éd.). Elsevier Masson, Paris.
- *Fusarium oxysporum*. Agronomie.
- Gams, W., & Nirenberg, H. I. (1989). Contributions to a revision of *Fusarium*. Mycotaxon, 32, 99–120.
- Gerlach W. & Nirenberg H. (1982), The Genus *Fusarium*: A Pictorial Atlas.
- Gerlach, W., & Nirenberg, H. (1982). The Genus *Fusarium*: A Pictorial Atlas. Biologische Bundesanstalt, Berlin.
- Ghafariyan, M. H., M. H., et al. (2013). Effects of iron oxide nanoparticles on soybean growth and physiology. Journal of Plant Nutrition, 36, 1446–1453.
- Grattidge, R., & O'Brien, R. G. (1982). Occurrence of a third race of *Fusarium* wilt of tomatoes in Queensland. Plant Disease, 66, 165–166.
- Gret. (2002). Mémento de l'agronome. Paris : Éditions du GRET. 1691 p. ISBN 978-2-86844-129-4. [Éd. du GRET pour le Ministère des Affaires étrangères et le CIRAD].
- He, L., L., et al. (2011). Antifungal activity of zinc oxide nanoparticles against *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum*. Microbiological Research, 166, 207–215.
- Heller, R. (1981). Physiologie végétale. Nutrition et métabolisme. Masson, Paris.
- Jones, J. B., Jones, J. P., Stall, R. E., & Zitter, T. A. (2014). Compendium of Tomato Diseases and Pests (2nd ed.). APS Press, St. Paul, Minnesota.
- Katan, T., Zamir, D., Sarfatti, M., & Katan, J. (1997). *Fusarium* crown and root rot of tomato: Disease characteristics and control. Plant Disease, 81, 255–262.
- Laumonnier, R. (1979). Culture maraîchère. J.-B. Baillière, Paris.
- Lecompte, F. & Causse, M. (2014). Variétés et systèmes de culture de tomate : les apports conjoints de la génétique et de l'agronomie. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 4(2), 23-34
- Leslie J.F. & Summerell B.A. (2006), The *Fusarium* Laboratory Manual.
- Leslie, J. F., & Summerell, B. A. (2006). The *Fusarium* Laboratory Manual. Blackwell Publishing, Ames, Iowa.
- Leslie, J. F., J. F., & Summerell, B. A. (2006). The *Fusarium* Laboratory Manual. Blackwell Publishing.
- Longuenesse, J. J. (1982). La tomate sous serre. CTIFL, Paris.
- Marlatt, R. B., Correll, J. C., & Kaufmann, P. (1996). Occurrence of race 3 of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in the United States. Plant Disease.
- McGrath, D. J., Gillespie, D., & Vawdrey, L. L. (1987). Inheritance of resistance to *Fusarium* wilt races in tomato. Australian Journal of Agricultural Research.
- Mémento de l'agronome (2003).
- Messiaen C.M. & Cassini R. (1968), La systématique des *Fusarium*.
- Naika S. et al. (2005), Cultivation of Tomato: Production, Processing and Marketing.
- Nelson P.E., Toussoun T.A. & Marasas W.F.O. (1983), *Fusarium* Species: An Illustrated Manual for Identification.
- Nelson, P. E., & Booth, C. (1972). Classification and identification of *Fusarium* species. Mycologia.
- Ozenda, P. (1990). Flore et végétation du Sahara. CNRS Éditions, Paris.
- Raemaekers R.H. (2001), Crop Production in Tropical Africa.

- Rey, C., & Costes, C. (1965). La culture de la tomate. Institut National Agronomique, Paris.
- Rouxel, F., et al. (1979). Les maladies vasculaires des plantes cultivées. INRA, Paris.
- Rui, M., M., et al. (2016). Iron oxide nanoparticles as a potential iron fertilizer for peanut. *Frontiers in Plant Science*, 7, 815.
- Shankara N., Joep L., Marja G., Martin H. & Barbara V.D. (2005), *Cultivation of Tomato: Production, Processing and Marketing*.
- Sirelkhatim, A., A., et al. (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial and antifungal activities. *Nano-Micro Letters*, 7, 219–242.
- Smith, I. M. (1965). The survival of *Fusarium oxysporum* in soil. *Annals of Applied Biology*.
- Snyder, W. C., & Hansen, H. N. (1940). The species concept in *Fusarium*. *American Journal of Botany*, 27, 64–67.
- Spichiger R., Savolainen V., Figeat M. & Jeanmonod D. (2004), *Botanique systématique des plantes à fleurs*.
- Stall, R. E. (1962). Development of *Fusarium* wilt races in tomato. *Phytopathology*, 52, 998–1000.
- Tello-Marquina, J. C., & Alabouvette, C. (1984). Étude des microconidies chez
- Tivoli, B. (1988). Étude des populations de *Fusarium oxysporum*. INRA, France.
- Volin, R. B., & Jones, J. P. (1982). A new race of *Fusarium* wilt of tomato in Florida and sources of resistance. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 95, 268–270.
- Walker J.C. (1971), *Fusarium Wilt of Tomato*.
- Singh, J., & Prasad, S. (2020). Nanoparticles in plant growth promotion: An emerging approach. In K. R. Hakeem, R. Bhat, & H. Qadri (Eds.), *Nanotechnology in the Agri-Food Industry* (pp. 1–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819421-1.00001-6>.

Annexe 1

Milieu Potato Dextrose Agar (PDA) Solide :

Pomme de terre 200g

Glucose 20g

Agar 20g

Eau distillée 1000ml

PH=6,5