

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

Ouffa Djamel Eddine

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN AGRONOMIE

Spécialité : Protection Des Végétaux

THEME

**Etude de l'effet biostimulant sur la tomate
(Lycopersicum esculentum Mill.) et biofongicide vis-à-vis
de Fusarium sp., des nanoparticules (ZnO).**

Devant le Jury:

Présidente : Dr S.Bergheul

MCA. U. Mostaganem

Examinatrice : Dr MI.Badaoui

MCB U. Mostaganem

Encadrante : Dr K.A Belhadji

MCA U. Mostaganem

Co-encadrante: Dr F.Saiah

MCB U. Mostaganem

Année universitaire : 2024-2025

Remerciements

Nous remercions tout d'abord **Allah**, qui nous donner la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Dr K.A Belhadji** et **Dr F Saiah**, notre encadrants, pour son accompagnement précieux, sa disponibilité et la qualité de ses conseils tout au long de cette recherche.

Nous remercions également les membres du jury :

- **Dr. S.Bergheul**, Maître de conférences A au département d'agronomie de l'Université Abdelhamid Ibn Badis.
- **Dr. MI.Badaoui**, Maître de conférences A au même département.

Pour le temps qu'elles ont consacré à l'évaluation de notre travail, ainsi que pour la richesse de leurs remarques et suggestions.

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à **toutes les personnes** qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce projet.

Dédicace

Tout d'abord, je remercie **Allah**, notre créateur de m'avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

Je dédie ce travail

Ma mère, mon amante, ma compagne, pour toutes ses sacrifices ses précieux conseils et encourageants dans ma vie.

Mon père, que je le remercie pour ses conseils, sa confiance et ses efforts.

Mes cher frères et sœurs

Mes meilleurs amis : Idriss, Islam, Lahcen, Chihab, Tayeb, Chouiab, Wail ;Iyed, Abderahman , Hossem, pour leur aide précieuse et le partage de leurs connaissances, qui ont enrichi notre recherche.

ET Tous nos enseignants sans exception.

Enfin, j'offre mes bénédictions à tous ceux qui m'ont soutenu dans l'accomplissement de ce travail.

Résumé

La tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) est l'un des légumes les plus cultivés et consommés au monde. Elle est particulièrement sensible aux infections fongiques, notamment par *Fusarium oxysporum*, responsables de pertes importantes en production et en qualité, aussi bien au champ qu'en post-récolte. Dans ce contexte, cette étude a évalué le potentiel biostimulant et antifongique des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO) sur la tomate industrielle variété Celia. Des tests in vitro ont été menés sur la croissance mycélienne *Fusarium oxysporum*, tandis que des essais in vivo ont été réalisés sur des plants de tomate en pépinière, à l'aide de différentes concentrations de nanoparticules de ZnO appliquées par l'application foliaire. Les résultats in vitro ont montré une efficacité antifongique significative des nanoparticules de ZnO contre les agents pathogènes testés. En conditions in vivo, les nanoparticules ont démontré un effet biostimulant notable sur la croissance des plants, avec une amélioration de la hauteur de 4 à 6% par rapport au témoin, ainsi qu'une modulation de l'architecture végétative et reproductive. La concentration C1 s'est révélée optimale, stimulant la floraison tout en maintenant un développement équilibré. Ces résultats soulignent le potentiel des nanoparticules de ZnO comme alternative innovante aux stimulants de croissance conventionnels, offrant à la fois des propriétés biostimulantes et une protection naturelle contre les agents pathogènes de la tomate industrielle.

Mots-clés : tomate, nanoparticule, *Fusarium oxysporum*, zno, antifongique.biostimulant.

Abstract

Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) is one of the most cultivated and consumed vegetables worldwide. It is particularly susceptible to fungal infections, notably by *Fusarium oxysporum*, responsible for significant losses in production and quality, both in the field and post-harvest. In this context, this study evaluated the biostimulant and antifungal potential of zinc oxide (ZnO) nanoparticles on industrial tomato variety Celia. In vitro tests were conducted on mycelial growth of *Fusarium oxysporum*, while in vivo trials were performed on tomato plants in nursery conditions, using different concentrations of ZnO nanoparticles applied through foliar application. In vitro results showed significant antifungal efficacy of ZnO nanoparticles against the tested pathogens. Under in vivo conditions, nanoparticles demonstrated a notable biostimulant effect on plant growth, with height improvement of 4 to 6% compared to the control, as well as modulation of vegetative and reproductive architecture. Concentration C1 proved optimal, stimulating flowering while maintaining balanced development. These results highlight the potential of ZnO nanoparticles as an innovative alternative to conventional growth stimulants, offering both biostimulant properties and natural protection against industrial tomato pathogens.

Keywords tomato, nanoparticle, *Fusarium oxysporum*, zno, antifungal.biostimulant.

الملخص

الطماطم (*Lycopersicon esculentum* Mill.) هي من أكثر الخضراوات زراعة واستهلاكاً في العالم. وهي حساسة بشكل خاص للعدوى الفطرية، خاصة بواسطة *Fusarium oxysporum*، المسؤولة عن خسائر مهمة في الإنتاج والجودة، سواء في الحقل أو بعد الحصاد. في هذا السياق، قيمت هذه الدراسة الإمكانيات المحفزة حيويًا والمضادة للفطريات للجسيمات النانوية من أكسيد الزنك (ZnO) على الطماطم الصناعية صنف سيليا. أُجريت اختبارات في المختبر على النمو الفطري لـ *Fusarium oxysporum*، بينما أُجريت تجارب في الحقل على نباتات الطماطم في المشتل، باستخدام تراكيز مختلفة من الجسيمات النانوية لأكسيد الزنك مطبقة عن طريق الرش الورقي. أظهرت النتائج في المختبر فعالية مضادة للفطريات كبيرة للجسيمات النانوية من أكسيد الزنك ضد مسببات الأمراض المختبرة. في ظروف الحقل، أظهرت الجسيمات النانوية تأثيراً محفزاً حيويًا ملحوظاً على نمو النباتات، مع تحسن في الارتفاع بنسبة 4 إلى 6% مقارنة بالشاهد، بالإضافة إلى تعديل في البنية الخضرية والتناسلية. أثبت التركيز C1 أنه الأمثل، محفزاً للإزهار مع الحفاظ على نمو متوازن. تسلط هذه النتائج الضوء على إمكانيات الجسيمات النانوية من أكسيد الزنك كبديل مبتكر للمحفزات التقليدية للنمو، مقدمة خصائص محفزة حيويًا وحماية طبيعية ضد مسببات أمراض الطماطم الصناعية.

الكلمات المفتاحية: طماطم، جسيمات نانوية، *Fusarium oxysporum*، zno، مضاد للفطريات، منشط حيوي.

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des Planches

Liste des abréviations

Donnée bibliographique

Chapitre 1 : Généralité sur la tomate

Introduction générale	1
1.1. Origine et Historique.	3
1.2. Présentation sur la tomate.....	3
1.3. Description botanique du plant de la tomate	4
1.3.1. Les racines	4
1.3.2. Les feuilles.....	4
1.3.3. Les fleurs.	4
1.3.4. Le fruit.....	5
1.4. Classification	6
1.5. Cycle de développement.....	6
1.6. Les maladies de la tomate.....	8

1.6.1. Les maladies fongiques	8
1.6.2. Les maladies bactériennes.	17
1.6.3. Les maladies virales.....	18
1.7. Exigences de la culture	19
1.7.1. Exigences climatiques	19
1.7.2. Exigences pédologiques.....	20
1.7.3. Exigences hydriques	21
1.8. Importance économique.....	21
1.8.1. La production de la tomate dans le monde.	21
1.8.2. En Algérie.....	22
1.8.3. À Mostaganem.....	22
1.9 Importance alimentaire	22

Chapitre2 : généralité sur les nano biofertilisants

1. Introduction.....	25
2. Constituants du nano biofertilisant.....	25
2.1. Nanoparticules.....	26
2.1.1. Nanoparticule de silicium (SiNP)	26
2.1.2. Nanoparticule de zinc (ZnNP)	27
2.1.3. Nanoparticule de cuivre (CuNPs)	29
2.1.4. Nanoparticule de fer (FeNP)	29
2.1.5. Nanoparticule de d'argent (AgNp).....	30
2.2. Biofertilisant	32
3. Formulation de nano biofertilisants.....	33

4. Nano biofertilisant pour améliorer la fertilité des sols.....	34
5. Réponses des plantes aux nano biofertilisants	35
6. Scénario actuel de la recherche et des applications des nano biofertilisants	37
7. Contraintes et perspectives d'avenir des nano biofertilisants	39

Matériel et Méthodes

1. Objectif de l'étude.....	42
2. Matériel et méthode d'étude	42
2.1. Zone et durée de l'expérience	42
2.2. Présentation de la zone d'étude	42
2.3. Matériel végétale	43
3. Protocole expérimentale	44
4. Paramètres morphologique.....	46
5. Modalités d'application du produit.	46
6. Protocole de dosage de la chlorophylle (a, b et totale) dans les feuilles de plante.....	47
7. Evaluation de l'activité antifongique de la nanoparticule ZnO	47
7.1. Matériel biologique	47
7.2. Nanoparticule	48
8. Méthodes utilisées	48
8.1. Repiquage de l'isolat	48
9. Etapes du protocole.....	50
10. Explication simple des formules	51

Résultats

I.	Etude de l'aspect macroscopique et microscopique de l'isolat <i>Fusarium sp</i>	53
a.	Etude macroscopique	53
b.	Etude microscopique	53
II.	Evaluation de l'activité antifongique « in vitro » de la nanoparticule vis-à-vis de <i>Fusarium sp</i>	54
III.	Effet biostimulant des nanoparticules	57
IV.	Dosage de la chlorophylle a,b et les caroténoïdes dans les feuilles de plante	
	Discussion.....	64
	Conclusion.....	68

Références bibliographiques

Annexe

Liste des figures

Figure1. Premières images de tomate publiées.....	3
Figure 2. Différentes formes de tomates utilisées pour décrire une variété.....	5
Figure 3. Cycle de vie de la tomate	7
Figure4. Les symptômes de la flétrissure fusarienne.....	9
Figure 5. Taches sur la foliole de tomate provoquée par alternaria.....	12
Figure 6. Symptomes d'alternariose sur tige et collet de plant de tomate.....	12
Figure 7. Lésions d' <i>Alternaria</i> sur les fruits de tomate	13
Figure8. Le cycle d'infection, le développement et les symptômes de l' <i>Alternaria</i>	14
Figure9. Symptomatologie de <i>botrytis cinerea</i>	15
Figure10. Mildiou sur la feuille	16
Figure11. l'oïdium sur les feuilles.	17
Figure12. L'application des nanoparticules et leur mouvement à l'intérieur des plantes.....	26
Figure13. Les différentes réponses directes et indirectes des rhizobactéries pour rendre la plante tolérante ou résistante au stress	32
Figure14. . La réponse des cellules végétales au stress hydrique et l'effet de l'application de nanoparticules et de biofertilisants.	34
Figure 15. Localisation géographique de la ferme expérimentale de Mazagran.....	40
Figure 16 : la tomate industrielle (photo originale 2025)	34
Figure 17 : Préparation le substrat pour la plantation (photo originale 2025)	34
Figure18 : La transplantation de la tomate (photo originale 2025).....	34
Figure19 : La solution des nanoparticules utilisée (photo originale 2025)	50

Figure 20 : solution de la chlorophylle.....	52
Figure 21 : Spectrophotomètre utilisé	53
Figure 22 : Aspect macroscopique des deux isolats ; <i>Fusarium</i> sp	55
Figure 23 : Aspect des <i>Fusarium</i> sp	55
Figure 24 : l'effet « in vitro » des différentes concentrations de la nanoparticule ZnO sur l'isolat de <i>Fusarium</i> sp. (Originale, 2025).....	60
Figure 25 : Effet de la nanoparticule ZnO sur la croissance mycélienne de <i>Fusarium</i> sp.....	60
Figure 26 : Vitesse de la croissance mycélienne de <i>Fusarium</i> sp. sous l'effet des différentes concentrations de la nanoparticule ZnO.....	62
Figure 27 : Taux d'inhibition de la croissance mycélienne de <i>Fusarium</i> sp. sous l'effet des différentes concentrations de la nanoparticule ZnO.....	62
Figure 28 : Évolution de la hauteur de la plante (cm) en fonction du temps chez la tomate sous différentes concentrations de nanoparticules.....	64
Figure 29 : Évolution du nombre de feuilles composées en fonction du temps chez la tomate sous différentes concentrations de nanoparticules.....	64
Figure 30 : Évolution du nombre de grappes de fruits en fonction du temps chez la tomate sous différentes concentrations de nanoparticules.....	64
Figure 31 : Évolution du nombre de fleurs en fonction du temps chez la tomate sous différentes concentrations de nanoparticules.....	65

Liste des Tableaux

Tableau01. Les principales maladies bactériennes de la tomate	17
Tableau02. Maladies virales de la tomate	18
Tableau03. Caractéristiques du matériel végétal.....	50
Tableau 04 : Modalités d'application des traitements du nano biofertilisant sur la culture de la tomate.....	55

Liste des abréviations

PDA : Milieu de culture (Potato dextrose agar).

F : Formulation.

FAO : Organisation des Nations Unies de l'Agriculture et de l'Alimentation.

D.S.A: Direction des Services Agricoles.

Ti : Témoin inoculé.

Tn : Témoin non inoculé.

NP : Nanoparticule

Partie bibliographique

Introduction

Introduction

La tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) est une plante annuelle appartient à la famille botanique des solanacées et originaire de l'Amérique du Sud. Compte parmi les cultures légumières les plus cultivées du monde, elle occupe la deuxième place dans la production maraîchère après la pomme de terre (Shankara Naika, 2005).

En Algérie, la culture de la tomate occupe une place prépondérante dans le secteur agricole en raison de son importance économique et sociale. Reconnue comme une filière stratégique, la production de tomate contribue significativement au développement économique national, tout en générant de nombreuses opportunités d'emploi, aussi bien directes qu'indirectes. Ce produit à forte consommation est devenu un pilier essentiel de la sécurité alimentaire et de l'approvisionnement des marchés locaux (Faostat, 2023).

Chaque année, près d'un tiers de la production agricole mondiale est perdu en raison de diverses maladies d'origine bactérienne, de ravageurs ou encore de champignons, entraînant des dégâts considérables. Ces pertes surviennent à toutes les étapes, depuis la culture des semis jusqu'à la commercialisation, compromettant ainsi la sécurité alimentaire et impactant lourdement le secteur agricole (Guenauoui, 2008).

Parmi les maladies les plus fréquentes l'Alternariose ; elle est causée par *Alternaria* sp., signalé depuis plusieurs décennies comme pathogène des Solanacées et a longtemps été décrit comme affectant la tomate, l'aubergine, la pomme de terre, ainsi que plusieurs espèces de cette famille botanique (Blancard et al., 2012). La fusariose est aussi une maladie redoutable, elle est causée par *Fusarium oxysporum* , un champignon tropical largement répandu, caractérisé par son agressivité, entraînant des dommages sévères (Hibar et al., 2007). Les deux maladies conduisant une diminution qualitative et quantitative du rendement de la culture. De nos jours la lutte chimique s'est révélée être une méthode de lutte performante et indispensable pour combattre les agents pathogènes (Leroux, 2003 ; Pezet et al, 2004). Cependant, l'utilisation systémique des produits phytosanitaires provoque des effets nocifs pour les organismes vivants et l'environnement. Le recours à des méthodes alternatives, notamment la lutte biologique, s'impose comme une nécessité.

Dans ce contexte que cette étude s'inscrit, dont évaluer l'effet biostimulant des nanoparticules sur la croissance et le développement de la tomate industrielle, ainsi que leur activité antifongique contre les agents pathogènes, à travers des approches expérimentales *in vitro* et *in vivo*.

Chapitre 1 :

Généralités sur la tomate

1. Généralité sur la tomate

1.1 Origine et Historique

La tomate est une plante herbacée (Figure1) originaire des Andes et d'Amérique du Sud. Elle a été introduite en Europe par les Espagnols au XVIe siècle et dans le reste du monde au XIXe siècle (Kolev, 1976). Ensuite elle s'est propagée en Asie du Sud et de l'Est, en Afrique et en Moyen Orient (Shankara et al., 2005).



Figure1. 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, Allemagne.

1.2 Présentation sur la tomate

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 premier légume après la pomme de terre et deuxième ressource alimentaire mondiale après les céréales. La tomate est adaptée à des conditions de culture très variées et destinée à la consommation fraîche ou à la transformation industrielle (Caussenet et al., 2000).

1.3 Description botanique du plant de tomate

La tomate est une plante annuelle buissonnante, caractérisée par ses tiges poilues et généralement grimpantes. Lorsqu'elle est froissée, elle dégage une odeur aromatique. Cette plante potagère herbacée présente une taille variable, allant de 40 cm à plus de 5 mètres, en fonction des variétés et des techniques de culture (Dumortier et *al.*, 2010).

1.3.1 Les racines :

Le système racinaire est pivotant, avec une racine principale qui peut atteindre une profondeur de 50 cm ou davantage. Celle-ci est accompagnée d'une grande densité de racines latérales et adventices. La tige, quant à elle, peut adopter une croissance érigée ou prostrée, atteignant une longueur de 2 à 4 mètres. Elle est pleine, glandulaire et fortement poilue. (Dumortier et *al.*, 2010).

1.3.2 Les feuille :

Les feuilles sont disposées en spirale et mesurent entre 15 et 50 cm de long, avec une largeur allant de 10 à 30 cm. Les folioles, ovées à oblongues, sont également couvertes de poils glandulaires. L'inflorescence se présente sous forme de cyme, composée de 6 à 12 fleurs. Le pétiole mesure entre 3 et 6 cm. (Dumortier et *al.*, 2010).

1.3.3 Les fleurs :

Les fleurs sont bisexuées, régulières, et ont un diamètre compris entre 1,5 et 2 cm. Elles sont opposées aux feuilles ou positionnées entre elles. Le calice est court et velu, avec des sépales persistants qui deviennent jaunes et incurvés lorsqu'ils mûrissent. Les fleurs possèdent 6 étamines aux anthères jaune vif, qui entourent le style, lequel se termine par une partie stérile allongée. L'ovaire est supère, composé de 2 à 9 carpelles. (Dumortier et *al.*, 2010).

La tomate est principalement autogame, bien que la fécondation croisée puisse également se produire.

1.3.4 Le fruit :

Le fruit est une baie charnue, de forme globulaire ou aplatie avec un diamètre de 2 à 15 cm. Lorsqu'il n'est pas encore mûr, le fruit est vert et poilu. La couleur des fruits mûrs varie du jaune au rouge en passant par l'orange. En général les fruits sont ronds et réguliers ou côtelés (Figure2). Les graines sont nombreuses, en forme de rein ou de poire. Elles sont poilues, beiges, 3 à 5 mm de long et 2 à 4 mm de large. L'embryon est enroulé dans l'albumen. 1000 graines pèsent approximativement 2,5 à 3,5 g (Naika et *al.*, 2005).

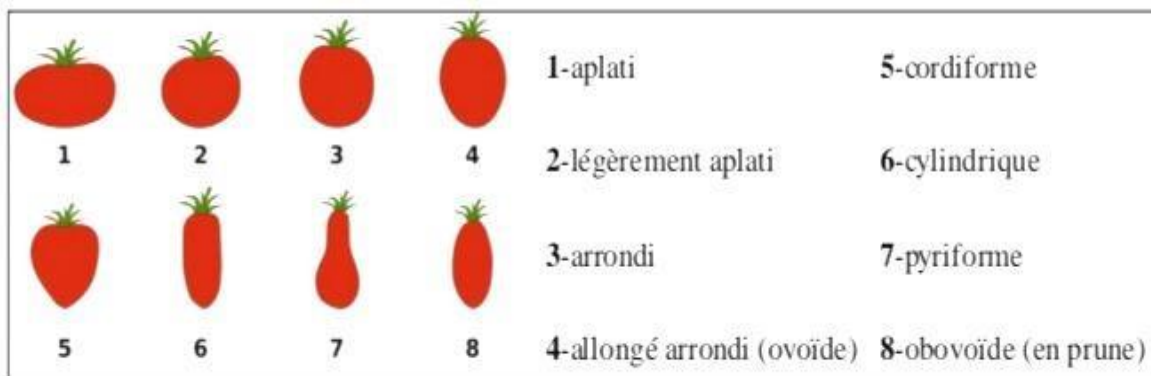


Figure2. Différentes formes de tomates utilisées pour décrire une variété (descripteur IPGRI)
(In Nicolas, 2010).

1.4 Classification

Selon Gaussen et *al.* (1982) la tomate est classée comme suit :

Règne : Plantae.

Sous règne : Tracheobionta.

Division : Magnoliophyta.

Classe : Magnoliopsida.

Sous classe : Asteridae.

Ordre : Solanales.

Famille : Solanaceae.

Genre : Lycopersicum.

Espèce : *Lycopersicum esculentum* Mill.

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 vossen et *al.*, 2004). La tigelle émerge alors du sol, accompagnée de deux feuilles cotylédonaires simples et opposées. Sous terre, la radicule se développe avec un manchon de poils absorbants clairement visible. (Mémento de l'agronome, 2003).

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 (Mémento de l'agronome, 2003)

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 (Mémento de l'agronome, 2003).

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 3) 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 (mémento de l'agronome, 2003).

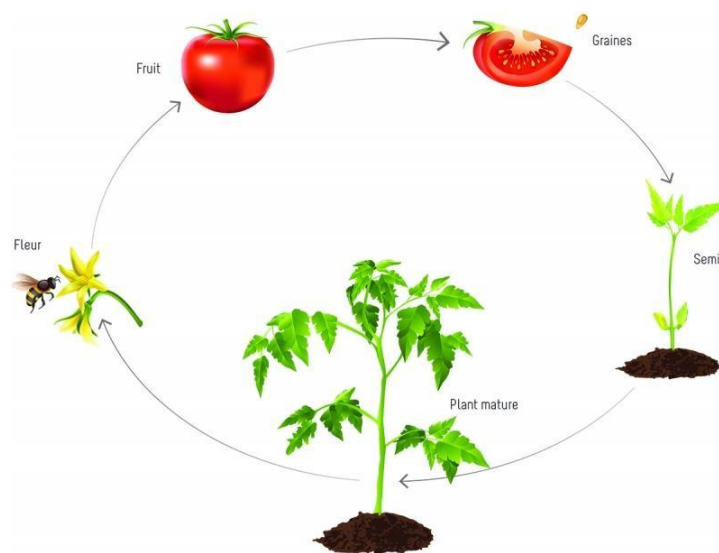


Figure3.Cycle de vie de la tomate (Parlons sciences, 2020).

1.6 Les maladies de la tomate

Les principales maladies de la tomate sont classées ci-dessous :

1.6.1 Les maladies fongiques

6.1.1 Fusariose

Les champignons telluriques du genre *Fusarium*, notamment l'espèce *Fusarium oxysporum*, figurent parmi les principaux agents pathogènes affectant les cultures commerciales (Armstrong et Armstrong, 1981). Reconnus pour leur forte phytopathogénicité, ils sont à l'origine de plusieurs maladies regroupées sous le terme de fusarioses, telles que la trachéomycose, la nécrose et la fonte des semis (Fravel et al., 2003).

Fusarium oxysporum est un champignon tropical largement répandu, caractérisé par son agressivité, entraînant des dommages sévères, notamment la pourriture racinaire et des tissus végétaux, sur un large éventail d'espèces économiquement essentielles (Hibar et al., 2007). Certaines souches pathogènes de cet organisme provoquent des fusarioses spécifiques à leurs plantes hôtes (Hibaret al., 2007). Par ailleurs, *F.oxysporum* est considéré comme un agent pathogène émergent préoccupant pour l'homme, en raison du nombre croissant de cas graves rapportés et de sa résistance élevée aux traitements antifongiques disponibles (Ito et al., 2007).

6.1.1.1 Classification de *Fusarium*

Règne : Fungi

Division : Ascomycota

Classe : Sordariomycetes

Sous-classe : Hypocreomycetidae

Ordre : Hypocreales

Famille : Nectriaceae

Genre : *Fusarium*

Espèce : *Fusarium oxysporum*.

6 .1.1.2 Les symptômes

a. Les Symptômes Externes :

Le champignon tellurique *Fusarium oxysporum f.sp. lycopersici* pénètre la plante par les racines et colonise les tissus lignifiés, entraînant un jaunissement progressif, un flétrissement et, à terme, la mort de l'hôte infecté (Blancard, 1997).

La maladie évolue rapidement, provoquant un flétrissement accéléré des parties foliaires affectées, semblable à un dessèchement (Si Mohammed, 2016). Le jaunissement débute à la base de la plante et progresse vers les parties supérieures, précédant la nécrose partielle ou complète du limbe, accompagnée d'un éclaircissement des nervures (Messiaen,1981 ; Gindrat, 1975).

Enfin, une dépression brune longitudinale apparaît à la base des feuilles, débutant au collet et s'étendant unilatéralement vers le haut de la plante (Bouhot, 1972).

b. Les symptômes internes :

Les tissus conducteurs apparaissent d'une couleur brune après une coupe longitudinale au niveau du rameau d'une plante atteinte (Figure4), alors qu'après une coupe transversale, des foncés bruns contenant souvent des mycéliens apparaissent (Si Mohammed, 2017).



Figure4. Les symptômes de la flétrissure Fusarienne. (Blancard, 2013 ; Blancard (1997).

A) Jaunissement et flétrissement unilatéral des folioles et des feuilles de la tomate. **B)** Brunissement longitudinal de la tige. **C)** Une coupe longitudinale de la tige montrant le brunissement des vaisseaux.

6.1.1.3 Physiopathologie du *Fusarium oxysporum*

Certaines espèces saprophytes sont capables d'évoluer en pathogènes secondaires lorsqu'elles colonisent des tissus végétaux sénescents. Parmi elles, les champignons du genre *Fusarium* sont particulièrement virulents, affectant diverses cultures, notamment les céréales (maïs, blé, orge, avoine), les légumes, les plantes ornementales et de nombreux arbres fruitiers. De plus, la majorité des espèces de *Fusarium* possèdent un potentiel toxinogène, produisant des mycotoxines susceptibles d'engendrer des intoxications chez les animaux d'élevage (Tabuc, 2007).

Les espèces les plus fréquemment retrouvées dans les substrats agricoles et caractérisées par leur pathogénicité et leur capacité à produire des toxines sont *Fusarium culmorum*, *Fusarium graminearum*, *Fusarium oxysporum* et *Fusarium verticilloides* (syn. *Fusarium moniliforme*) (Tabuc, 2007). En particulier, *F.culmorum* et *F.graminearum* sont responsables des pourritures racinaires affectant le blé dur et tendre ainsi que l'orge, une maladie qui sévit davantage dans les zones semi-arides ou lors des années à faible pluviométrie (Ezzahiri, 2001).

Chez le pois, *Fusarium oxysporum f.sp. solani* peut également être à l'origine de ces altérations pathologiques (Haglund et Kraft, 2001). Par ailleurs, le flétrissement vasculaire, considéré comme l'une des maladies les plus destructrices de nombreuses cultures, notamment les légumes et certaines espèces tropicales, est également provoqué par *Fusarium oxysporum* (Agrios, 2005).

6.1.2 L'Alternariose

Les *Alternaria* sont des champignons fréquents dans notre environnement. Ils appartiennent aux moisissures atmosphériques, comprend près de 275 espèces (Simmons, 2007). Avec des modes de vie saprophytes et phytopathogènes qui peuvent affecter les cultures sur champ ou les produits végétaux pendant la récolte et post- récolte (Logrieco et al., 2009). Ils peuvent se retrouver sur des substances très variées : plante, sols, graines.

L'alternariose (aussi appelée brûlure alternarienne) est une maladie causée par des champignons du genre *Alternaria* très répandue chez la famille des solanacées.

6.1.2.1 Classification

Règne : Fungi

Division : Ascomycota

Sous-division : Pezizomycotina

Classe : Dothideomycetidae

Sous-classe : Pleosporomycetidae

Ordre : Pleosporales

Famille : Pleosporaceae

Genre : *Alternaria*

Espèce : *Alternaria sp.*

6.1.2.2 Symptômes

- **Sur les Feuilles :**

Les premiers symptômes de la maladie se traduisent par l'apparition de petites lésions ovales et circulaires noires de 1 mm de diamètre sur les tiges et les feuilles (Figure5). Par la suite, elles s'étendent progressivement et s'auréolent d'un halo jaune souvent bien marqué. Atteignant plusieurs millimètres, elles révèlent souvent de discret anneaux concentriques d'un brun plus foncé (Blancard et *al.*, 2012).



Figure5. Taches sur foliole de tomate provoquée par *Alternaria* (Anonyme, 2020).

- **Sur les tiges et collets :**

Le pathogène peut également engendrer des lésions sévères sur les tiges, atteignant jusqu'à 5 cm de longueur (Figure6). Lorsque les conditions météorologiques sont favorables, ces lésions se développent progressivement sur les tiges et les pétioles. Par ailleurs, le dépérissement des extrémités du collet constitue un symptôme supplémentaire de la maladie (Patterson, 1991).



Figure6. Symptômes d'Alternariose sur une tige de plant de tomate (Anonyme, 2020).

- **Sur fruits et tubercules :**

Le pathogène induit l'apparition de chancres sur fruit, en creux à l'aisselle du calice à partir de lésions sur sépales (Messiaen et *al.*, 1991). Une fois les fruits verts ou murs sont envahis, les tissus colonisés prennent progressivement une couleur noirâtre occasionnant de larges lésions circulaires concaves, parfois plissés en surface à la texture plutôt dure (Figure7). Un dense feutrage les recouvre à terme correspondant à la sporulation d'*Alternaria* (Blancard et *al.*, 2012).



Figure7.Lésions d'*Alternaria* sur les fruits de tomate (Anonyme, 2020).

6.1.2.3 Cycle de développement du champignon *Alternaria*

Alternaria, un champignon pathogène, survit durant l'hiver dans les résidus végétaux contaminés présents dans le sol et peut être transmis par des semences infectées (Figure8). Au cours de la période de croissance, la dispersion des spores et du mycélium s'effectue par divers vecteurs, notamment le vent, l'eau, la pluie et les équipements agricoles.

Ce pathogène cible principalement les feuilles matures, entraînant une apparition plus tardive des symptômes par rapport à la brûlure cercosporéenne. La propagation de l'infection demeure relativement lente jusqu'à ce que les conditions environnementales deviennent favorables. En présence d'une forte chaleur et d'une humidité élevée, les lésions foliaires peuvent s'étendre rapidement, accélérant ainsi la progression de la maladie.

Les plantes affaiblies ou souffrant d'une carence en azote présentent une sensibilité accrue à l'infection, favorisant ainsi le développement de la maladie (Bélangier M. et *al.*, 2003).

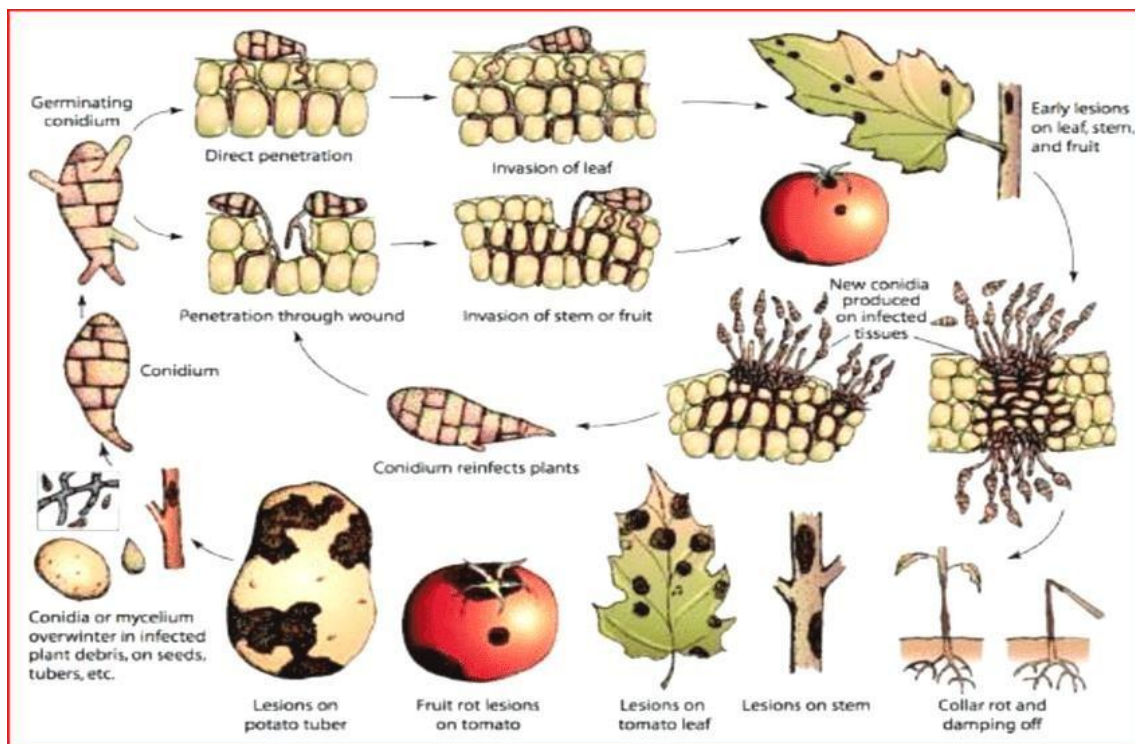


Figure8.Cycle d'infection, développement et symptômes de l'*Alternaria* (Agrios ,2005 ; Chaerni et voorrips,2006).

6.1.2.3 Pourriture grise de la tomate

La pourriture grise considérée parmi les maladies les plus redoutables en culture sous serre, elle est causée par *Botrytis Cinerea*, ce champignon peut attaquer toutes les parties de la plante principalement les feuille, la tige et le fruit.

6.1.3.1 Symptômes

Ca maladie se caractérise par des taches beiges en anneaux centriques par fois en forme de flamme en plus des chancres de couleurs gris beige légèrement déprimés avec un duvet grisâtre constitué des fructifications conidiennes du champignon (Figure9).

Sur fruit, On observe une pourriture molle avec affaiblissement des tissus qui débute généralement au niveau des sépales ou pétales desséchés. On peut aussi observer des anneaux blanchâtres appelés taches fantômes (El akel et *al.*, 2001).

Une humidité relative de 90% et une température 17 à 23°C sont les facteurs qui favorisent cette maladie. *Botrytis* est un champignon de faiblesse, alors lors de l'effeuillage, ébourgeonnement ou du tuteurage. Il y'a une propagation importante de l'infection (El akel et *al.*,2001).



Figure9. Symptomatologie de *Botrytis cinerea*. (Blancard, 2013).

(A) : Chancre sec sur tige et collet. (B): Attaque sur une inflorescence de tomate. (C) : Nécrose sur feuille de tomate. (D) : Attaque sur une plaie d'ébourgeonnement. (E) : Infection sur fruit de tomate. (F) : Taches fantômes sur tomate (Blancard et *al.*, 2009). (G) : Attaque sur fruit de fraise (Iñaki, 2015). (H) : Sclérotés de *B. cinerea* sur les sarments de vigne en hiver. (I): attaque sur courgette (Blancard, 2013). (J) : nécrose sur feuille de vigne. (K) : pourriture sur fruit de courgette (Blancard, 2013). (L) : Mycélium sporulant sur grappe de raisin. (M) : taches chocolat sur fève. (N) : pourriture de la pomme (Giraud, 2020). (O) : Mycélium sporulant sur fleurs de rosier. (P) : pourriture grise sur courge.

6.1.4 Mildiou

L'agent causal de cette maladie est *phytophthora infestans* ; un oomycète pathogène connu pour être l'agent responsable du mildiou de la pomme de terre et de la tomate, l'une des maladies les plus dévastatrices en agriculture. Il produit des spores qui se disséminent par le vent, la pluie ou l'irrigation. Ces spores peuvent germer directement ou produire des zoospores mobiles, qui infectent les tissus humides des plantes. Il peut former des oospores (structures de survie) en cas de reproduction sexuée, ce qui permet à l'agent pathogène de survivre dans le sol pendant l'hiver.

6.1.4.1 Les symptômes

Sur les feuilles, on observe des taches foliaires nécrotiques irrégulières, sur les tiges, de grandes taches brunes également irrégulières apparaissent, tandis que les fruits présentent des plages marbrées de couleur brune, souvent bosselées. (Blancard ,1988 ; Csizinsky et al.,2005).



Figure10.Mildiousur la feuille (Snoussi,2010).

6.1.5 L'Oïdium

6.1.5.1 Symptômes

Des taches jaunes sur la face supérieure des feuilles (Figure11) , où des spores blanches et poudreuses se développent, aussi bien sur la face supérieure que sur la face inférieure des feuilles. En cas d'infection sévère, on observe une sénescence des feuilles ainsi qu'une baisse de rendement. Ce pathogène n'infecte ni les fruits, ni les tiges. Le développement de la

maladie est favorisé par une humidité relative de 50 à 70% et une température comprise entre 20 et 25°C. La présence d'eau libre n'est pas nécessaire (El akel et *al.*,2001).



Figure 11. L'oïdium sur les feuilles (Taylor, 2016.)

1.6.2 Les maladies bactériennes

Les principales maladies bactériennes de la tomate sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau1. Les principales maladies bactériennes de la tomate (Blancard, 2009).

Nom de Maladie	Symptômes
<p style="text-align: center;"><i>Pseudomonas syringae</i></p> <p>Agent causal La moucheture bactérienne</p>	<p>Sur feuilles, la maladie se manifeste sous forme de minuscules taches noires, entourées d'un halo jaune constituant le symptôme le plus caractéristique. Sur fruits, Apparaissent des petites lésions superficielles brunes circulaires pouvant entraîner sa déformation</p>
<p style="text-align: center;"><i>Xanthomonas campestris</i></p> <p>Agent causal La gale bactérienne</p>	<p>Des taches sur toutes les parties aériennes de la plante. Ces taches sont souvent plus grosses que celles de la moucheture Sur fruits, de petites pustules</p>

<p style="text-align: center;"><i>Clavibacter michiganensis</i> Agent causal Le chancre bactérien</p>	<p>La maladie se manifeste souvent par un flétrissement, souvent unilatéral, qui débute par les feuilles de la base. Les folioles s'incurvent sur les bords avant de flétrir. Des stries noires apparaissent souvent sur les pétioles et sur les tiges. Sur tiges, une coupe longitudinale permet de montrer un fil blanchâtre, jaunâtre ou brunâtre au niveau des tissus vasculaires. La décoloration de la moelle et son détachement des tissus vasculaires. Sur fruits, se forment souvent de petites taches blanchâtres dont le centre brunit et s'entoure d'un halo jaune clair qu'on appelle « œil d'oiseau »</p>
---	---

1.6.3 Maladies virales

La tomate est toujours exposée à l'attaque d'une grande variété de virus : Les symptômes se manifestent le plus souvent par des altérations de la pigmentation (panachures) mais aussi par des nécroses et des déformations (Tableau 2).

Tableau 2. Les maladies virales de la tomate (Idrenmouche, 2011).

Maladies	Symptômes et dégâts
CMV Cucumber Mosaic Virus	Lorsque l'infection est précoce, on peut observer une stérilité des plantes ou une mal formation des fruits
TICV :Tomato Infectious Chlorosis Virus	Une jaunisse généralisée et un retard du développement de la plante. Apparition de nécroses ce qui entraîne de grandes pertes de rendement
TMV : Tobacco Mosaic Virus	Virus de la mosaïque du tabac Ce dernier est caractérisé par une mosaïque verte ou blanche, des folioles gaufrés devenant filiformes et ont tendance à s'enrouler, les fruits encore verts présentent une surface légèrement bosselée avec des plages nécrotiques brunes. Les fruits murs sont par semés de plages vertes.
ToCV Tomato Chorosis Virus	Virus de la jaunisse de la tomate. Un jaunissement généralisé à l'ensemble des folioles d'une feuille et un retard du développement de la plante
TSWV Tomato Spotted Wilt Virus ou virus de la maladie bronzée de la tomate.	Il est à observer des mouchetures en mosaïque avec une décoloration des feuilles. Sur les tiges et pétioles, il y a apparition des taches nécrotiques. Par contre sur les fleurs, on observe un nanisme, une déformation et une décoloration. La maladie peut entraîner un rabougrissement du plant.
TYLCV Tomato Yellow Leaf Curl Virus ou maladie des feuilles jaunes en cuillères de la tomate.	La croissance des plantes atteintes est fortement perturbée. Les feuilles sont de tailles réduites et présentent un jaunissement et ou un enroulement en forme de cuillères. En cas d'infection précoce, les plantes sont naines et ne produisent plus de fruits.

1.7 Exigences de la culture

La tomate est une plante sensible aux changements détectés dans son environnement. Ces changements peuvent affecter le cycle biologique et menacer la survie de la plante.

1.7.1 Exigences climatiques

- **La température :**

La tomate est une plante des saisons chauds, elle est exigeante en chaleur pour assurer son cycle végétatif complet, la température optimale pour sa croissance est de 18°C à 25°C pendant la journée et de 15°C à 16°C pendant la nuit. Selon Lambert (2006) la formation des organes florales et la floraison s'arrêtent à une température au-dessous de 10°C, et au-dessus de 38°C les tissus des plantes seront endommagés (Naika et *al.*, 2005).

- **Lumière et vent :**

La tomate n'est pas sensible au photopériodisme mais exigeante en énergie lumineuse. La longueur de l'obscurité est essentielle pour contrôle de la croissance et le développement de la plante. Un faible rayonnement lumineux réduit le nombre de fleurs par bouquet et affecte la fécondation (Cirad, 2002). Les vents chauds peuvent occasionner des brûlures sur les feuilles et des nécroses sur les fruits, en plus des dégâts causés par le vent fort telle la cassure des tiges (Grissa, 2010).

- **L'humidité :**

La tomate est une plante très sensible à l'hygrométrie. Elle ne tolère pas les sols engorgés ni l'humidité élevé (plus de 80%). Une hygrométrie relativement ambiante de 60% à 65% soit la meilleure. En effet, lorsque l'humidité est trop élevée, le pollen est difficilement libéré. Par ailleurs, le développement des maladies cryptogamiques est fortement lié à des fortes humidités accompagnées de la chaleur (Laumonier, 1979). Il est essentiel de prévoir un apport d'eau suffisant pendant la fructification, le stress causé par une carence d'eau et durant des longues périodes fait tomber les bourgeons et les fleurs et provoque le fendillement des fruits (Munro et *al.*, 1998).

1.7.2 Exigences pédologiques

- **Type de sol :**

La tomate demande de sols profonds, frais mais humides, riches en humus et en matières fertilisantes, légers et légèrement acides. Dans les sols lourds, il faut prévoir un drainage suffisant. La qualité du sol n'est pas prédominante pour la tomate. Il lui suffit d'avoir un sol profond et bien drainé. Les sols argileux ne donnent que de très faibles rendements (Andry, 2010).

- **PH du sol :**

La culture de tomate préfère un sol légèrement acide ($5,8 < \text{pH} < 6,8$). Alors qu'un sol à pH basique ($\text{pH} > 7$) peut bloquer l'absorption de certains micro-éléments par la plante (Fe, Mn, Zn, Cu). La carence la plus fréquente étant celle du fer, elle apparaît en général à un stade avancé de la culture. Dans ce cas, une correction ferrique par un apport d'engrais foliaire ou en fertilisation est nécessaire (Grissa, 2010).

- **La salinité :**

La plante est moyennement sensible à la salinité ; les engrais chlorurés semblent cependant ne pas lui convenir (Letard, 1995). La culture de tomate tolère une conductivité électrique (CE) de l'ordre de 3 à 4,5 mmohs/cm. L'impact de la salinité est plus grave sur le rendement suite à la réduction du calibre du fruit. Donc elle doit être maintenue entre 1 et 2 mmohs/cm à 25°C en fonction du stade de la culture et de la saison (Skiredj, 2006 et Ammari, 2012).

1.7.3 Exigences hydriques

Les besoins en eau de la tomate se situent entre 4000 et 5000 m³/ha. Cependant 3 phases physiologiques correspondant à des besoins en eau différents sont à distinguer :

- ✓ De la plantation à la 1^{ère} floraison : phase de croissance lente, les besoins en eau sont peu élevés.
- ✓ De la floraison à la maturation : phase de croissance rapide, les besoins en eau sont élevés.
- ✓ De fin de récolte : phase de vieillissement, les besoins en eau sont réduits (Anonyme, 1995).

1.8 Importance économique

1.8.1 La production de la tomate dans le monde

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).

1.8.2 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-irrigue, avec une production d'environ 90% de la production nationale.
- **Zone Centre** : représente 12% des superficies et regroupe les wilayas de Blida, d'Alger, Boumerdes, Bejaia, Chleff, Tipaza et Ain Defla.
- **Zone Ouest** : Cette zone regroupe les wilayas de Mostaganem, Relizane, Mascara, Sidi-Bel-Abbès et Tlemcen. Elle représente 2,7% des superficies de la culture de tomate.
- **Zone Sud** : est représentées par les wilayas d'Adrar et Biskra.

1.8.3 A Mostaganem

Selon les statistiques de la Direction des services agricoles « DSA », la wilaya de Mostaganem est classée parmi les premiers producteurs de tomate en Algérie. Cette wilaya enregistrant une production de 1,33 millions de qx sur une superficie de 2438,5 ha, on distingue que la culture de tomate occupe une place très importante dans la production maraichère sur le plan de la superficie et par conséquent sur la production. (Anonyme, 2022).

1.9 Importance alimentaire

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

Chapitre 2 :

Les Nano-biofertilisants

Introduction

L'agriculture moderne fait face à un défi majeur : l'intensification de la demande mondiale pour les produits agricoles a été satisfaite par l'utilisation excessive d'engrais conventionnels, entraînant une pollution environnementale significative, une dégradation des sols et de l'eau, ainsi que des préoccupations de santé publique (Khanam et al., 2024). Dans ce contexte, l'utilisation efficace de nanomatériaux ingénierés peut remplacer les fertilisants et pesticides conventionnels, minimisant par la suite l'impact environnemental des approches agricoles (Parveen et al., 2023).

Les nano-fertilisants (NFs) représentent une innovation technologique majeure qui utilise des nanoparticules (1-100 nanomètres) pour améliorer l'efficacité des nutriments végétaux (Singh et al., 2023). Cette technologie émergente, qui possède un rapport volume/surface élevé grâce à sa composition en nanomatériaux, peut améliorer l'efficacité d'absorption des macronutriments avec de plus petites quantités par rapport aux fertilisants traditionnels (Martinez et al., 2024). Un problème majeur de l'agriculture moderne est l'inefficacité des engrais conventionnels, où une proportion significative du contenu nutritionnel, incluant l'azote, le phosphore et le potassium, est perdue du sol, l'efficacité d'utilisation de l'azote en agriculture demeurant autour de 50% (Kumar et al., 2023 ; Parveen et al., 2023).

Les nano-fertilisants se distinguent par leurs propriétés de libération contrôlée qui permettent une synchronisation entre la disponibilité des nutriments et les besoins de la plante, stimulant ainsi la productivité (Sahu et al., 2024). La composition des nano-fertilisants facilite l'absorption efficace des nutriments, la restauration de la fertilité du sol, l'ultra-haute absorption, l'augmentation de la photosynthèse (Kumar et al., 2022). Cette approche représente un changement paradigmatique vers des fertilisants avancés qui améliorent l'efficacité d'utilisation des nutriments, favorisent la croissance des cultures et minimisent les dommages environnementaux en permettant une livraison précise des nutriments (Chen et al., 2025), répondant aux défis de la sécurité alimentaire mondiale tout en préservant l'écosystème.

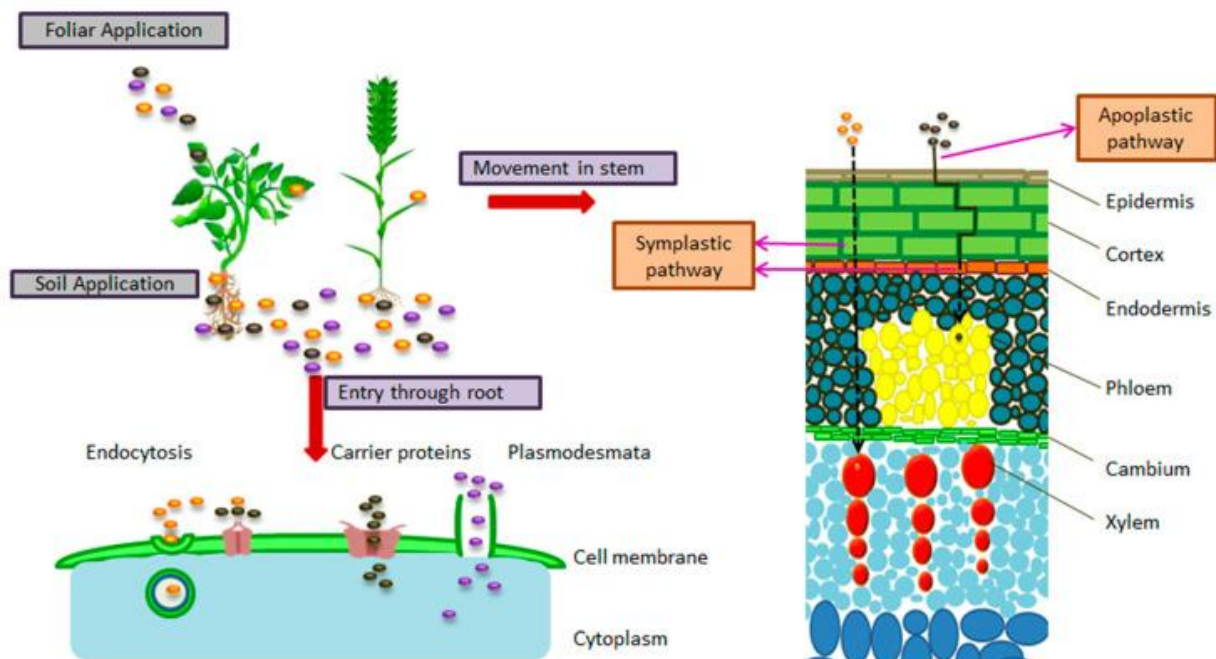
2. Constituants du nano biofertilisant

2.1 Nanoparticules

Les nanoparticules sont des particules microscopiques, généralement comprises entre 1 et 100 nm. Les nanoparticules couramment utilisées pour la formulation de nanobiofertilisants sont le silicium, le zinc, le cuivre, le fer et l'argent. L'absorption et l'accumulation des nanoparticules dans les plantes dépendent de leur composition chimique, de leur forme, de

leur taille et de leur état d'agglomération. La translocation des nanoparticules est inversement proportionnelle à leur taille. Elle est également liée à 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 type de nanoparticule. Différentes nanoparticules utilisent différents mécanismes pour améliorer la croissance des plantes (Fatima A., Singh S., Prasad S.M..2020).

Lorsque les nanoparticules sont appliquées dans la rhizosphère, elles pénètrent dans les racines des plantes par endocytose, par l'intermédiaire de protéines porteuses ou par les plasmodesmes. Lorsqu'elles sont appliquées sous forme de pulvérisation foliaire, elles diffusent simplement 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 des nanoparticules dépend du type de plante et du type de nanoparticules (Pérez-de-Luque A..2017) (figure12). Le détail des nanoparticules utilisées dans la synthèse des nanobiofertilisants est présenté ci-dessous.



La figure 12. L'application des nanoparticules et leur mouvement à l'intérieur des plantes.

2.1.1 Nanoparticules de silicium (SiNP)

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 M., Cornu S., Saby N.P.A., Meunier J.-D..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 est de $>1\%$ de la biomasse sèche de la plante, tandis que les non-accumulateurs ont une teneur en Si $< 1\%$ (Mc Ginnity P.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 M., Landberg T., Vaculík M.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 N., Réthoré E., Yvin J.-C., Hosseini S.A.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* (L Han Y.-Q., Wen J.-H., Peng Z.-P., Zhang D.-Y., Hou M.-L.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 M.N., El-Hoseiny H., El-Sheery N.I., Rastogi A., Kalaji H.M.2017).

2.1.2 Nanoparticules de zinc (ZnNP)

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 S., Lohani P.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 *T. 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 M., Adnan M., Javed M.S., Habibah U.E., Arshad A., Mughees M., Ahmad R.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 *Z. 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 D., Sun D., Wang C., Ding H., Qin H., Hou J., Huang X.2017*)

L'application de ZnNP 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 ZnNP augmentent le rendement de *Sorghum bicolor (L.) Moench.* de 22 à 183 % sous stress hydrique par rapport aux plantes non traitées [50]. 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 T., Rahmani F.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.* à 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 W., Abdelkhalik A., Mohamed G.2021).

2.1.3 Nanoparticules de cuivre (CuNPs)

Le cuivre (Cu) est un nutriment essentiel à la croissance normale des plantes. Il joue un rôle structurel 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 structurel 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 Z.N., Jafari A.A., Moradi P., Moghadam A.L.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 Z., Sardar A.2020*).

L'absorption rapide et la libération lente des CuNP en font un excellent candidat. Il a été démontré que l'application de Cu et de ZnNP améliorerait les paramètres morphologiques et physiologiques d'*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 CuNP 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 (*López-Vargas E.R., Ortega-Ortíz H.2018*).

2.1.4 Nanoparticules de fer (FeNP)

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 M.S., Sayfzadeh S2020,).

L'application de nanofertilisants réduit les effets néfastes des engrais chimiques, et leur application par voie terrestre 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 *C. sinensis*, *A. indica* et *Eucalyptus tereticornis* (Sm.) (Herlekar M., Barve S.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 (Ebrahimezhad A., Zare-Hoseinabadi A.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 *F. vesca*, car ils montrent de bons résultats lorsqu'ils sont appliqués à la culture in vitro de plantes (Mozafari A.A., Havas F.2018).

2.1.5 Nanoparticules d'argent (AgNP)

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 F., Razzaq A.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 M., Keleş Y.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 M., Qari S.H.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 H., Prasanna R2020).

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 M., Nejad A.R.2021).

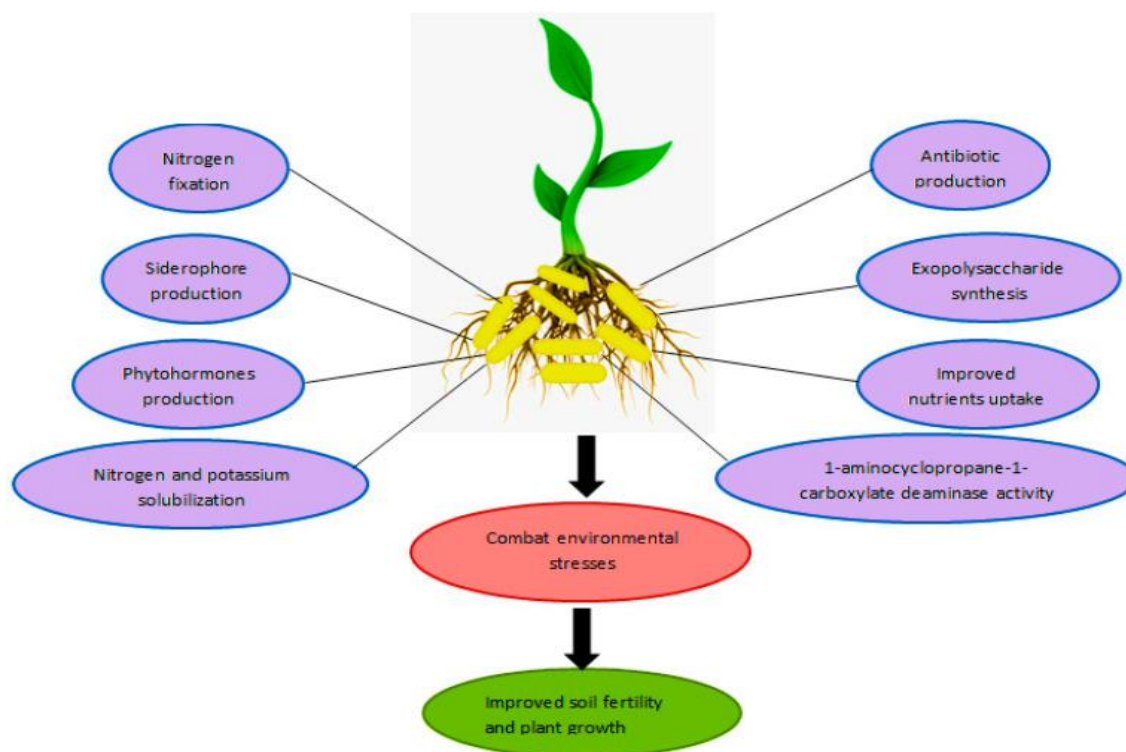
L'application foliaire d'AgNP a augmenté le poids frais et la teneur en chlorophylle de 32 % et 23 %, respectivement, chez *S. lycopersicum* infecté par *A. solani*. La diminution du nombre de spores fongiques a été de 48 %, et l'activité des enzymes de stress, responsables de la tolérance au stress 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 F.2021).

2.2. Biofertilisant

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 Z., Sohrabi Y.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 XIXe 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 J.M., Piccinetti C.F.2020).



La figure 13. Les différentes réponses directes et indirectes des rhizobactéries pour rendre la plante tolérante ou résistante au stress.

Le rôle des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes dans leur croissance et leur tolérance au stress. La fixation de l'azote, la solubilisation des minéraux et la production de sidérophores et de phytohormones par les PGPR favorisent la croissance des plantes. La production d'antibiotiques et d'autres métabolites contribue à la lutte biologique contre les phytopathogènes (Figure13).

La synthèse d'exopolysaccharides, d'osmolytes et d'antioxydants contribue à la tolérance au stress. Ils libèrent des substances favorisant la croissance des plantes, effectuent la solubilisation du phosphate et du potassium et fixent l'azote atmosphérique dans le sol (*Kusale S., Attar Y.2021*).

Certains biofertilisants libèrent un sidérophore qui séquestre le Fe, le rendant indisponible pour les organismes pathogènes et inhibant la croissance des pathogènes. (*Nithyapriya S., Lalitha S., Sayyed R.2021*)

Ils produisent diverses phytohormones telles que l'acide indole-3-acétique, les gibbérellines, les cytokines, l'acide abscisique, etc, qui contribuent à la croissance et au développement des plantes. Cependant, les problèmes liés aux biofertilisants incluent leur exigence de dose élevée pour couvrir une grande surface, leur faible qualité, leur faible performance dans un environnement fluctuant et leur durée de conservation inférieure aux normes. L'utilisation de nanobiofertilisants a permis de surmonter de nombreux problèmes, et l'agriculture s'appuie sur la nanotechnologie pour améliorer la croissance et le rendement des cultures et maintenir l'écosystème naturel. Ils favorisent la libération lente de l'engrais et préservent sa qualité (*Kalam S., Basu A.2020*).

3. Formulation de nano biofertilisants

Le nano biofertilisant est une combinaison de nanoparticules et de biofertilisants. Il peut améliorer l'efficacité de l'utilisation des nutriments par les plantes en les libérant lentement. Il peut également améliorer les propriétés du sol en conférant des effets durables sur ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. La formulation du nano biofertilisant comprend l'encapsulation de nanoparticules avec le biofertilisant. Cela protège les souches bactériennes du stress mécanique, et la libération lente des nutriments améliore encore l'efficacité du produit. L'encapsulation est un processus d'hébergement des cellules du biofertilisant dans la capsule du nanomatériau. Elle implique l'utilisation d'un matériau non toxique et biodégradable, tel que l'alginate de calcium, et d'amidon. L'amidon favorise la croissance des souches bactériennes (*Vafa Z., Sohrabi Y.2021*).

La synthèse des nano biofertilisants implique trois étapes essentielles : (1) la croissance de la culture de biofertilisant ; (2) son encapsulation avec les nanoparticules ; et (3) l'évaluation de son efficacité, de sa qualité, de sa pureté et de sa durée de conservation (*Panichikkal J., Puthiyattil N.2021*).

Le nano biofertilisant peut également être préparé sous forme de microcapsule. Sa synthèse implique le mélange d'une suspension de PGPR avec un mélange de 1,5 % d'alginate de sodium, 3 % d'amidon et 4 % de bentonite dans un rapport de 2:1. Le mélange est enrobé d'une solution de chlorure de calcium réticulant et les microcapsules sont lavées à l'eau distillée stérile (*Saberi-Rise R.2019*).

Une combinaison de nanoparticules et d'acide salicylique a également été utilisée pour préparer le nano biofertilisant. Dans cette méthode, le biofertilisant est mélangé à de l'alginate de sodium (2 %), des ZnONP (1 µg/mL) et de l'acide salicylique (1,5 mM). La solution est enrobée de chlorure de calcium (solution à 3 %) et des billes de 1 mm sont formées, séchées à l'air et incubées à 4 °C (*Panichikkal J., Prathap G.2021*).

Il a été rapporté que des déchets organiques tels que des fleurs, de la bouse de vache et des déchets de cuisine peuvent également être combinés aux nanoparticules pour fabriquer un nanobiofertilisant efficace qui améliore la fertilité des sols. Les déchets organiques ont été lavés à l'eau pour éliminer les impuretés, hachés en petits morceaux et soumis à une décomposition ou une pyrolyse. Ces déchets partiellement décomposés ou pyrolysés ont été combinés à des nanoparticules pour fabriquer un nanobiofertilisant (*Singh P., Ghosh D.2019*).

4. Nano biofertilisant pour améliorer la fertilité des sols

Aujourd'hui, l'utilisation incontrôlée d'engrais chimiques perturbe la structure des sols, pollue les ressources en eau, provoque l'eutrophisation, la toxicité des sols et le lessivage des nutriments, et a un effet toxique sur l'écosystème et la santé humaine. Il est nécessaire de travailler sur la gestion de la santé des sols pour une agriculture productive et durable. Les nutriments du sol doivent être gérés correctement afin de répondre aux besoins des cultures sans impact négatif sur l'écosystème (*Mahapatra D.M., Satapathy K.C.2022*).

Les nanobiofertilisants améliorent la fertilité des sols grâce à diverses stratégies, notamment :

- (a) la restauration des nutriments par fixation de l'azote et solubilisation du phosphore
- (b) l'amélioration de la capacité d'absorption des nutriments par le sol
- (c) la production de sidérophores qui chélatent le fer et séquestrent les métaux lourds pour les rendre indisponibles pour les plantes

(d) la production de phytohormones et de solutés compatibles

(e) la conservation de l'humidité du sol

(f) le développement d'une résistance ou d'une tolérance des plantes aux stress biotiques et abiotiques. Ils améliorent également l'efficacité de l'utilisation des nutriments par les plantes (*Shafiei-Masouleh S.2021*).

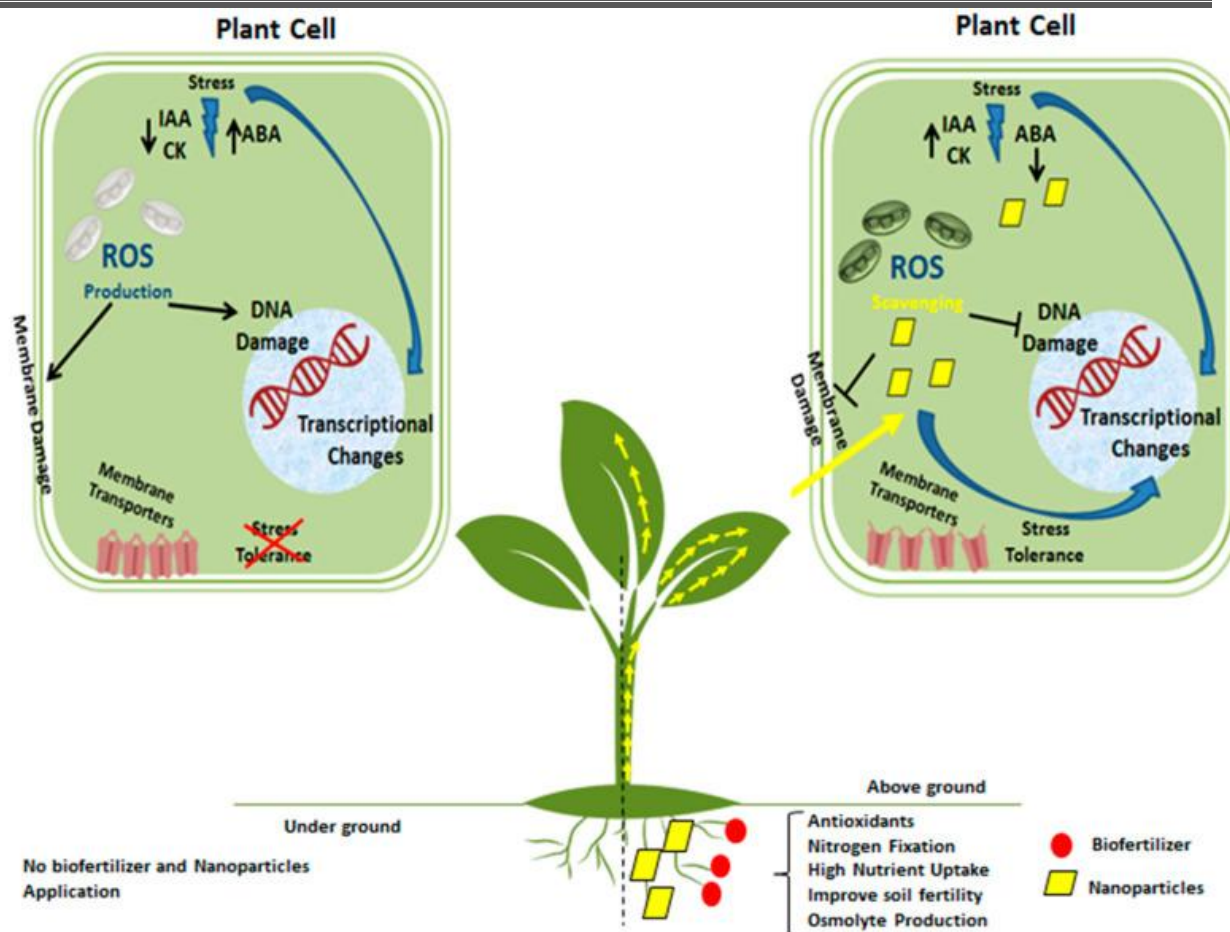
5. Réponses des plantes aux nanobiofertilisants

L'utilisation de nanobiofertilisants améliore considérablement la croissance des plantes. L'enrobage des nanoparticules par des biofertilisants améliore leur efficacité et provoque leur libération lente et prolongée dans la rhizosphère végétale. Ils maintiennent la dissolution de l'engrais et réduisent les risques de lessivage (*Ali S.S., Darwesh O.M.2021*).

Ils améliorent également la qualité des cultures, c'est-à-dire que la production de métabolites secondaires tels que les antioxydants enzymatiques (catalase, superoxyde dismutase et peroxydase) et non enzymatiques (phénols et flavonoïdes) est augmentée. Ces métabolites prolongent la durée de conservation des légumes et des fruits et présentent divers bienfaits pour la santé (*Paschalidis K., Fanourakis D.2021*).

Les nanobiofertilisants contribuent à la bioremédiation et réapprovisionnent le sol en nutriments essentiels. Ils régulent positivement les gènes responsables de la production d'antioxydants, d'osmolytes et de protéines liées au stress, réduisent les effets néfastes des ROS sur les plantes et maintiennent la structure et la fonction cellulaires (figure14). Ils préservent également la production hormonale accrue des transporteurs membranaires et leurs activités (*Vedamurthy A.B., Bhattacharya S.2021*).

Lorsque les plantes reçoivent ces traitements, leurs systèmes antioxydants s'activent, protégeant la membrane cellulaire et les organites des effets néfastes du stress. Ils augmentent également leurs niveaux d'hormones de croissance, notamment d'acide indole acétique et de cytokinine, tout en réduisant la production d'hormones de stress (acide abscissique). Ces changements rendent la plante tolérante au stress et augmentent les chances d'établissement des cultures dans des conditions environnementales défavorables (*Ilyas N., Arshad A.2022*).



La figure 14. La réponse des cellules végétales au stress hydrique et l'effet de l'application de nanoparticules et de biofertilisants.

Le Rôle des nanobiofertilisants sur la plante en situation de stress. En conditions de stress, des espèces réactives de l'oxygène (ERO) sont produites, endommageant les organes cellulaires de la plante. L'application de nanobiofertilisants favorise la fixation de l'azote, la solubilisation des nutriments, l'amélioration de la fertilité du sol et la production d'antioxydants et d'osmolytes. Ces antioxydants et osmolytes aident la plante à piéger les ERO.

Il a été observé que les biofertilisants (PGPR) contrôlent la disponibilité des nutriments dans le sol, y compris les nanoparticules. Une expérience a été conçue pour évaluer le rôle des nanoparticules sur *S. lycopersicum* avec et sans inoculation d'*Azotobacter salinestris*. *Azotobacter salinestris* a synthétisé des exopolysaccharides (EPS). Ces EPS ont piégé les nanoparticules, maintenu leur concentration dans la rhizosphère et minimisé les effets néfastes de la concentration élevée de certaines nanoparticules (Ahmed B., Syed A.2021).

L'inoculation de *Bacillus fortis* + ZnNP chez *Cucumis melo* L. sous stress cadmium a amélioré les pigments photosynthétiques, la biomasse végétale, la teneur en flavonoïdes, les composés phénoliques, la transpiration et la conductance stomatique. Elle réduit l'absorption,

la translocation et l'accumulation de cadmium métal dans les plantes.

L'interaction des biofertilisants et des NP azotées augmente les niveaux de potassium, de phosphore et d'azote disponibles dans le sol de respectivement 126 %, 283 % et 38 %. Ils interagissent avec le sol et les racines des plantes et améliorent la disponibilité et l'absorption des nutriments. Les biofertilisants, y compris les rhizobactéries, libèrent des acides organiques dissolvant les nutriments tels que l'acide citrique, l'acide propionique, l'acide lactique, l'acide céto gluconique, l'acide succinique et l'acide gluconique. Ils fixent également l'azote atmosphérique et rendent le sol fertile. Ils augmentent le taux de photosynthèse, et l'analyse des parties de la plante a montré un niveau élevé de nutriments, notamment de potassium, de phosphore et d'azote (Rahman A., Al Jabri A.B.2020).

6. Scénario actuel de la recherche et des applications des nanobiofertilisants

Les chercheurs s'intéressent de plus en plus à l'utilisation des nanoparticules en agriculture en raison des résultats rapides qu'elles fournissent. Les nanoparticules peuvent être combinées à d'autres composés pour fabriquer des engrais intelligents, mais peu de recherches ont été rapportées. Récemment, peu d'articles ont été publiés sur la formulation et l'utilisation de nano biofertilisants, et cela constitue une étape vers le développement d'un nouveau produit plus efficace pour les cultures.

Un nano biofertilisant a été préparé en Iran, et son application a augmenté la quantité de proline, de glucides et d'anthocyanes chez *Hibiscus sabdariffa* et *Foeniculum vulgare* sous stress hydrique .

Jahangir et al ont mené leurs expériences au Pakistan pour montrer que l'application combinée de PGPR et d'Ag NP augmente le poids d'*Allium cepa* face à une salinité élevée. Ils ont également signalé que la co-application augmentait la teneur en sucre et l'expression de certaines nouvelles protéines dans les plantes(Akhtar N., Ilyas N.2022).

Les teneurs en chlorophylle, caroténoïdes, flavonoïdes et phénols étaient également élevées chez les plantes recevant l'application combinée de PGPR et d'Ag NP. En Inde, l'application de *Pseudomonas taiwanensis* et de nano-gypse a amélioré la diversité bactérienne et leur croissance, augmenté la disponibilité des nutriments et augmenté l'humidité du sol (Jahangir S., Javed K.2020).

L'application de ce nano biofertilisant a également amélioré l'activité des enzymes du sol. Le nano-gypse soutient la population bactérienne et a des effets positifs sur la structure du sol ; il peut être utilisé comme alternative aux produits agrochimiques. L'action collaborative de *Pseudomonas taiwanensis* et du nano-gypse augmente la germination, la longueur des

racines, la longueur des pousses et la teneur en chlorophylle chez *Z. mays* (Chaudhary P., Khati

P.2021).

Des chercheurs indiens ont également montré que l'utilisation de nano-chitosane augmentait le nombre de colonies de PGPR. Ils agissent en synergie et améliorent les attributs de germination et de croissance de *Z. mays* (Chaudhary P., Sharma A.2021).

L'utilisation d'un biofertilisant nanocomposite sur *T. aestivum* et *Cicer arietinum* a amélioré la biomasse végétale, le rendement des cultures et la résistance des plantes au stress biotique (Gahoi P., Omar R.A.2021).

L'application inappropriée et à forte dose de Zn est toxique pour les plantes et provoque une pollution des sols. Le travail collaboratif de chercheurs chinois et pakistanais montre que le nanobiofertilisant (contenant des nanoparticules de Zn) réduit les effets toxiques du Zn et constitue un engrais efficace à libération lente. Il augmente le nombre de feuilles, la hauteur de la plante, le poids de 1 000 grains, le poids de l'épi et le poids biologique de 35 %, 15 %, 10 %, 4 % et 42 %, respectivement. Il améliore également le taux de photosynthèse, la conductance stomatique et la transpiration (Saboora A., Ali M.2021).

L'application simultanée de *Mesorhizobium sp.*, de *Pseudomonas* et de nano-silice améliore la structure et la fertilité du sol. Ils agissent également comme un promoteur de croissance des plantes et augmentent le poids frais et sec des plantes (.Boroumand N., Behbahani M.2020).

En Égypte, une expérience a été réalisée pour évaluer l'effet de l'application unique et combinée de NP de Fe + Zn et d'engrais organique sur *Phaseolus vulgaris*. Les résultats montrent que l'application combinée de nanoparticules de fer et de zinc et d'engrais organique a eu des effets significatifs sur la croissance des plantes et a amélioré la qualité physique et nutritionnelle des gousses. L'analyse du sol à la fin de l'expérience a également montré qu'ils ont amélioré la qualité du sol et l'ont rendu plus fertile (Baddour A.G., Attia R.H.2021).

Des chercheurs irakiens ont combiné un biofertilisant avec un mélange de nano éléments et ont analysé leur effet sur deux variétés de *P. vulgaris*. L'interaction de ces éléments à l'échelle nanométrique a considérablement amélioré l'absorption des nutriments, la formation de nodules, l'activité nitrogénase, le nombre de racines par plante et la teneur en acides aminés (Al-Burki H.A., Al-Ajeel S.A.2021).

Des nano biofertilisants sont synthétisés à travers le monde. Il est néanmoins nécessaire d'étudier leur effet sur les plantes à l'échelle moléculaire (Zarayneh S., Jafari M.2020).

Il est néanmoins nécessaire de préparer un nano biofertilisant performant à grande échelle, et sa commercialisation est nécessaire.

7. Contraintes et perspectives d'avenir des nano biofertilisants

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. Bien que certains articles fassent état de la formation de nanobiofertilisants, il n'existe aucune recherche détaillée sur leur mécanisme d'action pour améliorer la croissance des plantes. 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 R., Kaur M.2021*).

À ce jour, peu de recherches ont été menées sur le développement et l'application des nanobiofertilisants. Il est nécessaire de former des nanobiofertilisants en fusionnant correctement nanoparticules et biofertilisants. Notre recommandation pour l'avenir est la suivante :

- Il est nécessaire d'utiliser des équipements et des protocoles avancés pour formuler des nanobiofertilisants de bonne qualité, avec une durée de conservation plus longue, un faible coût et une facilité d'utilisation.
- Une étude détaillée des nanobiofertilisants devrait être menée pour évaluer leurs effets sur la santé humaine.
- Il faudrait développer un nanobiofertilisant multifonctionnel qui conviendra à plusieurs cultures.
- Une évaluation économique des nanobiofertilisants devrait être réalisée. Leur compatibilité avec différents types de sols et d'environnements devrait être testée.
- Les industries devraient collaborer pour réaliser une production à grande échelle et des essais sur le terrain devraient être réalisés.
- Il est nécessaire de sensibiliser les agriculteurs aux effets secondaires des engrais chimiques et à la manière dont les nanobiofertilisants réduiront les coûts et produiront des effets durables

Partie expérimentale

Matériel et méthodes

1. Objectif de l'étude

L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet biofertilisant des nanoparticules sur la croissance et le développement de la tomate industrielle, ainsi que leur activité antifongique contre *Fusarium sp.*, à travers des approches expérimentales *in vitro*. L'évaluation repose sur deux paramètres ; le taux d'inhibition de l'extension mycélienne, et la vitesse de croissance des champignons testés.

2. Matériel et méthode d'étude

2.1. Zone et durée de l'expérience

L'expérience a été conduite dans une serre, établis entre mars et juin 2025, sur une parcelle d'Université Abdelhamid IbnBadis Mostaganem. La période totale de l'expérimentation, incluant le suivi des paramètres de croissance, a duré quinze semaines

2.2. Présentation de la zone d'étude

Le site retenu pour notre étude est situé entre la commune de Mostaganem au nord, Mazagran à l'ouest, Hassi Mamèche au sud et Douar Djedid à l'est. Cette zone est caractérisée par un climat semi-aride avec une hygrométrie comprise entre 60 et 70% pendant la période estivale, les températures moyennes oscillent entre 25 et 30°C en été et de 6 à 13°C pendant l'hiver.

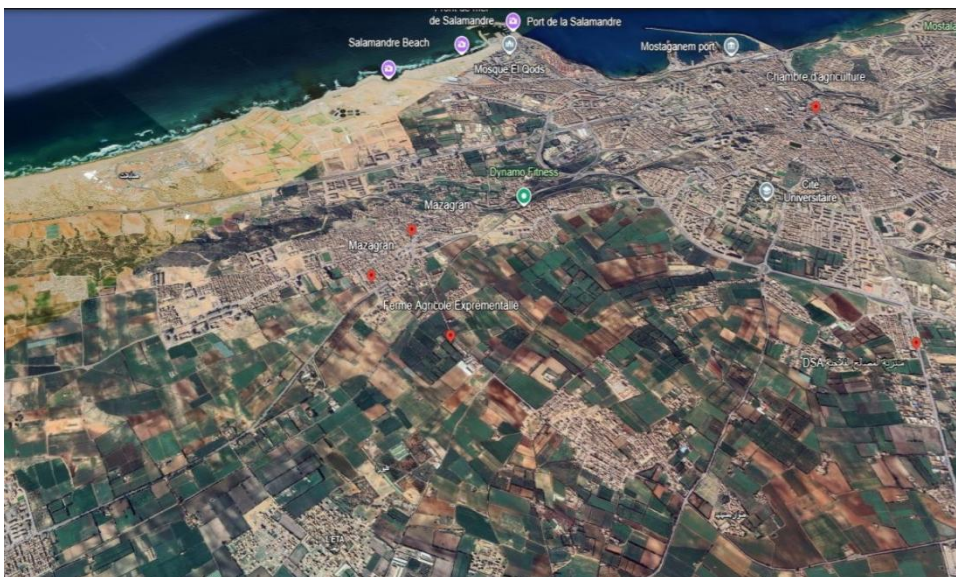


Figure 15. Localisation géographique de la ferme expérimentale de Mazagran (Google Earth, 2025).

La ferme expérimentale de Mazagran, située dans la wilaya de Mostaganem (Algérie), est une infrastructure de recherche relevant de l'université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem. Mazagran bénéficie d'un climat méditerranéen avec : Précipitations modérées, concentrées entre novembre et mars. Avec un été chaud et sec, favorable à certaines cultures rustiques et tests de résistance au stress abiotique. La ferme est située à environ 7 km au sud-ouest du centre-ville de Mostaganem, à proximité de la route nationale N11 reliant Mostaganem à Oran. Elle est délimitée au nord-est par la ville de Mostaganem, chef-lieu de wilaya, comprenant notamment les quartiers de Tigditt, Hay Salem et El Houria ; à l'ouest par la commune de Kheïr Eddine, caractérisée par la présence de plusieurs exploitations agricoles ; au sud par la commune de Sayada, zone semi-rurale en expansion ; et à l'est par les quartiers périphériques de Mostaganem tels que Hai Essalam et Tobna.

2.3. Matériel végétal

La variété utilisée est Celia correspond à une variété hybride F1 semi-déterminée (Figure 16.), c'est une variété à bon rendement, elle est caractérisée (tableau 03) par une tige haute, vigoureuse, avec de grandes feuilles de couleur vert foncé, les fruits sont de couleur rouge foncé à maturité avec un poids moyen de 140 à 160 g. C'est une variété à bon rendement, elle est très appréciée dans la région, enfin, elle est cultivée en serre ou en plein champs

Tableau 03 : Caractéristiques du matériel végétal.

Feuilles	Une forme ovoïde de couleur vert foncé avec une longueur de 10 à 15 cm, larges et vigoureuses.
Tige	Elle est ligneuse à la base et herbacée, haute et vigoureuse avec une croissance forte et déterminée.
Système racinaire	Le système racinaire est pivotant et bien développé avec un développement horizontal important permettant une bonne absorption.
Fleurs	Blanchâtres, pendantes sous-dressées, regroupées en grappes avec une largeur de 2 à 3 cm.
Fruits	La couleur est rouge foncé à maturité avec une texture ferme, poids moyen de 140 à 160 g, adaptés à la transformation industrielle.
Maladies et ravageurs	Résistante aux virus TY (enroulement jaune), TSWV (maladie bronzée), aux nématodes (N), au Verticillium (V) et au Fusarium races 1 et 2 (FF).



Figure 16 : La tomate industrielle (photo originale 2025)

- **La culture de la tomate**

L'installation de la culture a eu lieu le 25/02/2025 dans une serre en plastique de dimensions 50 m × 8 m × 5 m (longueur × largeur × hauteur), abritant 25 plants organisés en 5 rangées de pots.

3. Protocole expérimental

- **Préparation des pots**

Un mélange de sol et de tourbe a été préparé afin d'obtenir un substrat équilibré, alliant la capacité de rétention en eau de la tourbe aux apports nutritifs du sol. Ce substrat a ensuite été utilisé pour le remplissage des pots destinés à la plantation. (Figure17)



Figure 17 : Préparation le substrat pour la plantation (photo originale 2025)

➤ **La transplantation**

La transplantation de la tomate a été effectuée le 25/02/2025, après la préparation des pots (figure18)



Figure18 : La transplantation de la tomate (photo originale 2025)

➤ **Dispositif expérimentale**

- **Nombre total de plants** : 25 plants de tomate (variété Celia), disposition : 5 lignes × 5 plants par ligne. On a traité le témoin juste avec l'eau distillé

Ligne 1 : T1 T2 T3 T4 T5

Ligne 2 : C1p1 C1p2 C1p3 C1p4 C1p5

Ligne 3 : C2p1 C2p2 C2p3 C2p4 C2p5

Ligne 4 : C3p1 C3p2 C3p3 C3p4 C3p5

Ligne 5 : C4p1 C4p2 C4p3 C4p4 C4p5

➤ **Conduite et entretien**

Des travaux d'entretien ont été assurés tout au long du cycle de développement de la culture, notamment une irrigation réalisée deux fois par semaine à l'aide d'un système à roue, ainsi qu'un désherbage manuel visant à limiter la concurrence des adventices, sans recours à l'utilisation de produits chimiques.

4. Paramètres morphologique

Les paramètres ont été mesurés pour chaque traitement dans les pots témoins et traitées (par le nano biofertilisant) afin d'étudier la réponse des plants tomate au nano testé. Des mesures quantitatives sur la longueur des plants ont été réalisées à l'aide d'un mètre ruban et une règle. Aussi, d'autres paramètres ont été pris à savoir le nombre des feuilles, des fleurs et des fruits.

5. Modalités d'application du produit

La méthode d'application consiste à pulvériser le nano-biofertilisant sous forme de fine brume directement sur le feuillage. Cette approche favorise une absorption rapide des nutriments et des composés bioactifs à travers les stomates, situés à la surface des feuilles, assurant ainsi une distribution ciblée et une efficacité optimale. Pour réaliser le traitement, nous avons utilisé un pulvérisateur pour pulvériser les plantes par le nano (figure 19).



Figure19 : la solution des nanoparticules utilisée (photo originale 2025)

Les modalités d'application de ces traitements sont affichées dans le tableau 04. Le tableau ci-dessous présente le calendrier des applications foliaires du nano-biofertilisant au cours des différents stades phénologiques de la tomate. Après la transplantation (11/03 et 17/03/2025), deux applications initiales ont été réalisées afin de favoriser l'adaptation et l'enracinement des plants. Durant le stade végétatif, une pulvérisation a été effectuée le 08/04/2025, correspondant au stade de floraison, puis une autre le 15/04/2025, marquant l'apparition des fleurs. Enfin, deux interventions supplémentaires (23/04 et 29/04/2025) ont eu lieu au stade final, lorsque la plante présentait simultanément fleurs et fruits. Ce protocole, basé exclusivement sur la pulvérisation foliaire, permet une assimilation rapide et ciblée des nutriments via les stomates, assurant ainsi un apport optimal au cours des phases critiques de croissance et de fructification de la plante.

Tableau 04 : Modalités d'application des traitements du nano biofertilisant sur la culture de la tomate

Dates application	Stade de développement de la Plante	Méthode d'application
11/03/2025 17/03/2025	Après la transplantation	Par pulvérisation
Stade végétatif		
08/04/2025 15/04/2025	Stade de floraison	
Stade Apparition des fleurs		
23/04/2025 29/04/2025	Stade final (fleurs et fruits)	

7. Evaluation de l'activité antifongique des nanoparticules ZnO

7.1. Matériel biologique

Le matériel fongique utilisé est une espèce de *Fusarium* sp, isolé à partir de plants de tomate présentant des symptômes de flétrissement et pourriture racinaire. Après purification des isolats ces derniers ont été conservés sur milieu PDA incliné, au laboratoire de protection des végétaux.

7.2. Nanoparticules

Les nanoparticules utilisées pour ce test sont les mêmes utilisées dans le test précédent.

8. Méthodes utilisées

8.1. Repiquage de l'isolat

Afin de préparer les isolats pour le test de l'effet antifongique du nanoparticule étudié et antifongique nous avons fait des repiquages par les étapes suivantes :

- Préparation du milieu PDA, ensuite ajout de l'antibiotique oxytétracycline. Le milieu est ensuite réparti dans des boîtes de Pétri à raison de 15 ml par boîte.
- L'ensemencement est réalisé avec des explants de 5 mm de diamètre prélevés de la périphérie d'une culture âgée d'environ 7 jours.
- Ces échantillons sont déposés au centre de la boîte de Pétri dans des conditions aseptiques pour éviter toute contamination de l'isolat. Les boîtes sont incubées à 25°C.

8.2. Evaluation de l'activité antifongique « in vitro » de la nanoparticule

8.2.1. Evaluation de l'activité antifongique

a) Préparation des milieux de cultures

Quatre concentrations différentes de nanoparticules (0%, 25%, 50%, 100%), sont préparées dans du milieu PDA afin d'obtenir une quantité de 50 ml de solution, qu'on a réparti en 3 répétitions pour chaque concentration. Il s'agit d'une mise en contact direct qui permet la mise en évidence de l'activité antifongique.

b) Technique de repiquage

A l'aide d'une pipette pasteur stérile, un fragment de culture fongique de 5 mm de diamètre a été découpé à partir d'une culture mycélienne du champignon, puis a été déposé au centre de la boîte de Pétri.

Les boîtes de Pétri sont ensuite fermées hermétiquement et incubées à 25°C. Des mesures quotidiennes de diamètre des colonies ont été effectuées pour chaque concentration afin d'évaluer la croissance mycélienne, la vitesse de croissance et le taux d'inhibition des isolats étudiés. Les mesures sont prélevées jusqu'au remplissage totale de l'une des boîtes.

c) Evaluation de la croissance mycélienne

La croissance mycélienne a été évaluée toutes les 24 heures en mesurant la moyenne de deux diamètres perpendiculaires passant par le milieu de l'explant mycélien.

La lecture est réalisée en comparaison avec les cultures témoins (concentration 0%) qui ont démarrés le même jour et dans les mêmes conditions. La technique employée pour le calcul de la croissance mycélienne est celle décrit par BREWER (1960), qui consiste à mesurer la croissance linéaire et diamétrale des colonies en les appliquant à la formule suivante :

$$L = (D - d) / 2$$

L : croissance mycélienne

D : diamètre de la colonie

d : diamètre de l'explant (0.5cm)

d) Evaluation de la vitesse de croissance mycélienne

La vitesse de la croissance mycélienne est obtenue dans la formule suivante :

$$V = \frac{(L2 - L1) + (L3 - L2) + (L4 - L3) + \dots \dots \dots (Ln - 1 - Ln)}{n - 1}$$

Où :

V = Vitesse de croissance (mm/j).

L = Croissance mycélienne (mm).

L1 = Croissance mycélienne au 1er jour.

Ln = Croissance mycélienne du dernier jour.

n = Nombre de jours durant le test

e) Taux d'inhibition de la croissance mycélienne (TI%)

Les résultats obtenus à partir de l'estimation de la croissance mycélienne sont aussi exprimés en taux d'inhibition par rapport à la croissance mycélienne du témoin. La technique consiste à mesurer les diamètres des différentes colonies de champignons après le temps d'incubation qu'on applique à l'équation.

$$TI (\%) = \frac{(VT - VE)}{VT} \times 100$$

TI (%) = Taux d'inhibition exprimé en pourcentage

VT = vitesse de croissance des colonies dans les boîtes témoins

VE = vitesse de croissance des colonies dans les boîtes contenant ZnO

9. Étapes du protocole :

1. Préparation de l'échantillon

- Prélevez environ **0,2 g** de feuilles fraîches (évittez les nervures centrales).
- Découpez-les en petits morceaux.

2. Extraction de la chlorophylle

Les feuilles ont été broyées dans un mortier en présence de 10 mL d'acétone à 80 % (ou d'éthanol) jusqu'à obtention d'une pâte homogène. Le broyat obtenu a ensuite été filtré ou centrifugé afin de récupérer le surnageant vert, correspondant à la solution riche en chlorophylle. Le volume final a été ajusté à 10 mL avec le même solvant, si nécessaire.

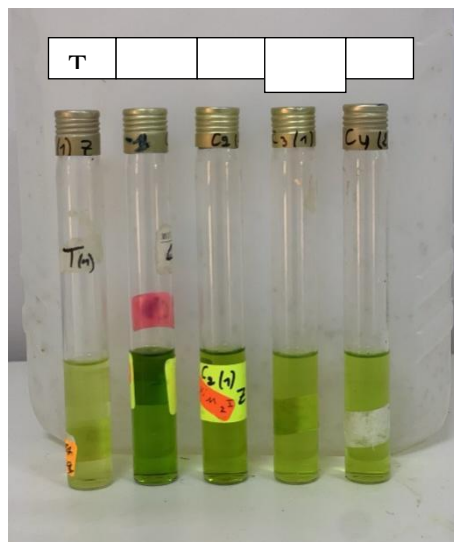


Figure 20 : Extraction de la chlorophylle

3. Lecture spectrophotométrique

L'absorbance de l'extrait a été mesurée à 663 nm pour la chlorophylle a et à 645 nm pour la chlorophylle b, en utilisant comme blanc le solvant pur (acétone ou éthanol). Facultativement, une lecture supplémentaire a été effectuée à 470 nm afin d'estimer la teneur en caroténoïdes.

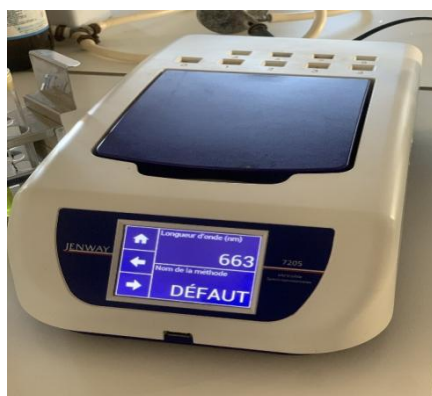


Figure 21 : Spectrophotomètre utilisé

11. Explication simple des formules

Ces formules permettent de calculer la quantité de chlorophylle dans votre extrait à partir de la lecture spectrophotométrique. Ces équations ont été établies par Arnon (1949).

Formules classiques avec acétone 80% :

- Chlorophylle a (mg/L) = $12,7 \times A_{663} - 2,69 \times A_{645}$
- Chlorophylle b (mg/L) = $22,9 \times A_{645} - 4,68 \times A_{663}$
- Chlorophylle totale (mg/L) = $20,2 \times A_{645} + 8,02 \times A_{663}$

Où :

- A_{663} = absorbance mesurée à 663 nm (liée à la chlorophylle a)
- A_{645} = absorbance mesurée à 645 nm (liée à la chlorophylle b)

Résultats et discussion

I. Etude de l'aspect macroscopique et microscopique de l'isolat *Fusarium* sp.

a) Etude macroscopique

La colonie est de type cotonneux dense et possède une bordure souvent diffuse et très abondante.

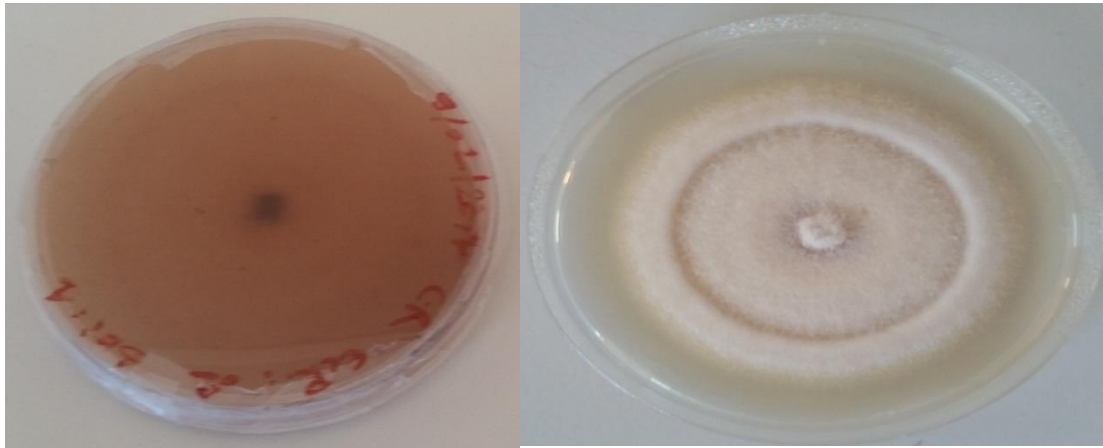


Figure 22 : Aspect macroscopique des deux isolats ; *Fusarium* sp.

b) Etude microscopique

L'étude microscopique montre la présence de macroconidies typiques multicellulaires, hyalines, fusiformes (en forme de canoé).



Figure 23: Aspect des *Fusarium* sp.

II. Evaluation de l'activité antifongique « in vitro » de la nanoparticule vis-à-vis de *Fusarium* sp.

La figure N°24, représente les résultats de l'effet de la nanoparticule ZnO sur la croissance mycélienne de *Fusarium* sp., on remarque une nette différence dans la croissance des différents traitements. Malheureusement nous n'avons pas remarqué une absence totale de croissance, malgré qu'elle fût très réduite pour la concentration de 100%. Ce test n'a pas permis d'atteindre la CMI.



Figure 24 : l'effet « in vitro » des différentes concentrations de la nanoparticule ZnO sur l'isolat de *Fusarium* sp. (Originale, 2025).

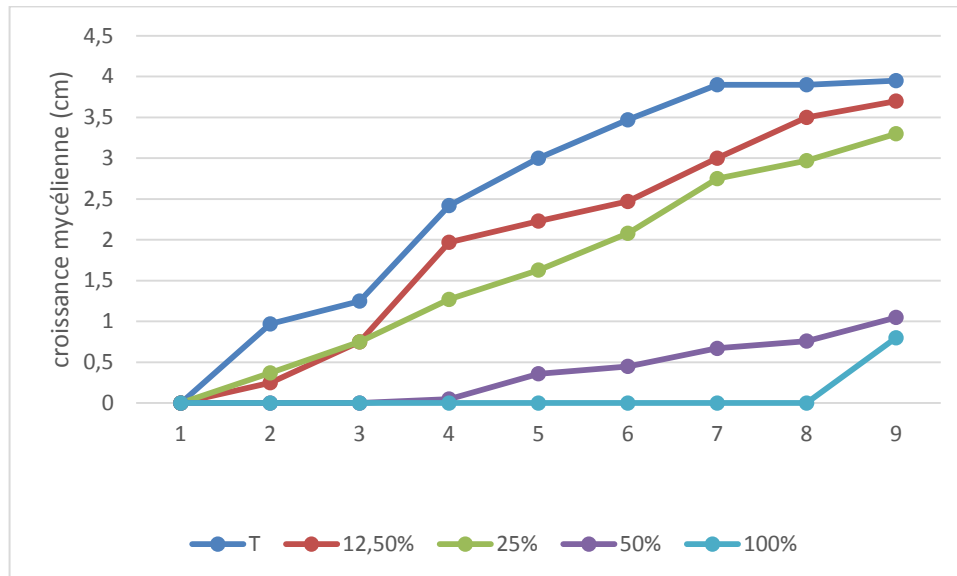


Figure 25 : Effet de la nanoparticule ZnO sur la croissance mycélienne de *Fusarium* sp.

La figure 25, représente les résultats de l'effet de la nanoparticule sur la croissance mycélienne de *Fusarium* sp.,

Les résultats obtenus pendant les jours du test, représenté sur la Figure25, démontrent un effet significatif des différentes doses sur la croissance mycélienne de l'isolat fongique. Nous avons remarqué que la croissance du champignon est inversement proportionnelle à la dose de la nanoparticule ZnO. La réduction de la croissance était significativement plus importante et plus nette aux doses de 50% et 100%. Principalement pour cette dernière ou nous n'avons enregistré qu'une très légère croissance à partir du 8^{ème} jours lorsque les boîtes témoins étaient complètement recouvertes de mycélium.

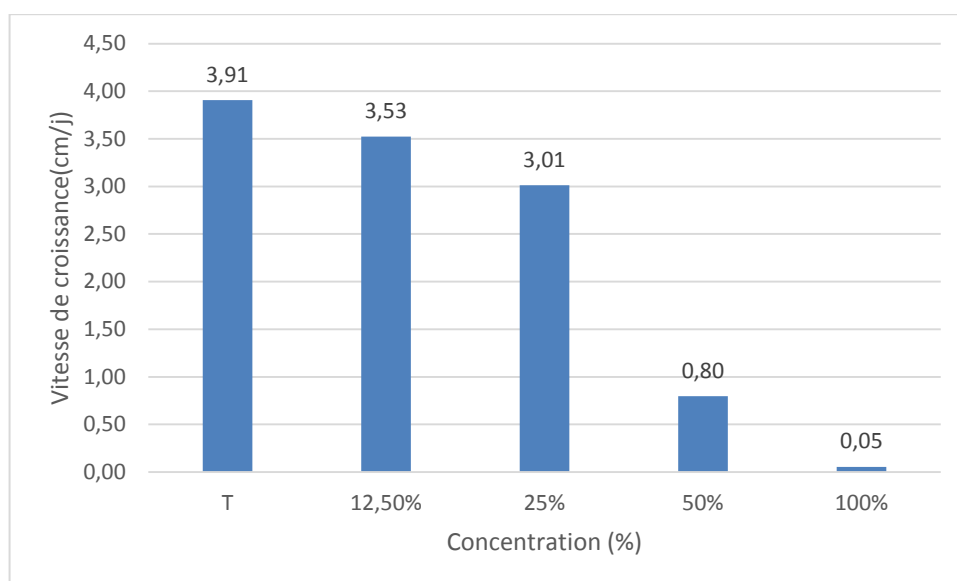


Figure 26 : Vitesse de la croissance mycélienne de *Fusarium* sp. sous l'effet des différentes concentrations de la nanoparticule ZnO.

Les valeurs de la vitesse de croissance mycélienne de l'isolat de *Fusarium* sp. à différentes concentrations diminuent considérablement avec l'augmentation de la dose comparativement aux témoins ou la croissance était particulièrement rapide (Figure 26).

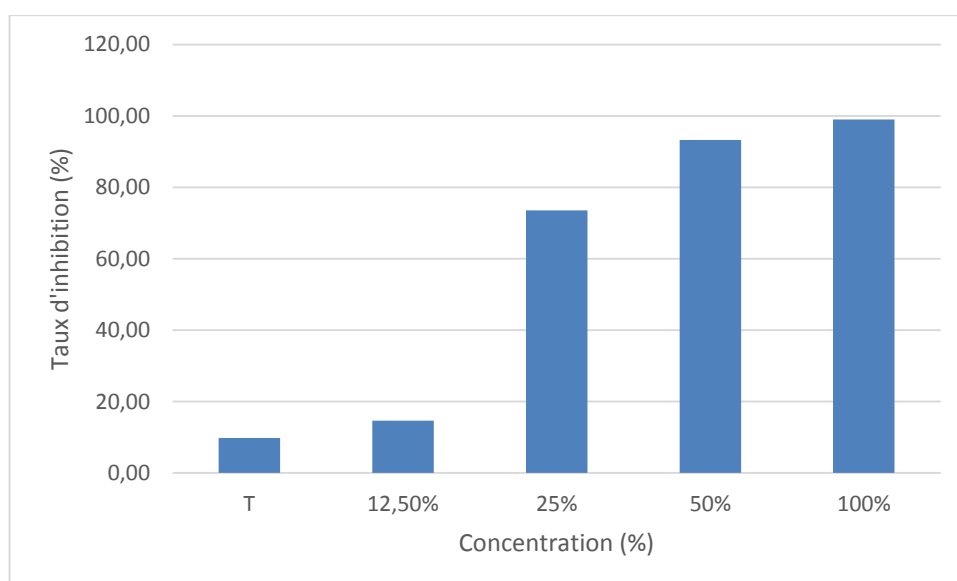


Figure 27 : Taux d'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium* sp. sous l'effet des différentes concentrations de la nanoparticule ZnO.

La Figure 27, démontre que le taux d'inhibition est inversement proportionnel à la croissance mycélienne c'est-à-dire que l'absence de croissance mycélienne signifie que le taux d'inhibition est de 100 %. Malheureusement nous n'avons pas remarqué une absence totale de croissance, malgré qu'elle fût très réduite pour la concentration de 100%.

Ces résultats démontrent une efficacité remarquable de cette nanoparticule à réduire le développement de cet isolat.

III. Effet biostimulant des nanoparticules :

Les résultats de l'effet biostimulant des nanoparticules de ZnO sont illustrés sur les figures 28-31. Les paramètres testés sont : la hauteur de la plante en (cm), nombre de feuilles composées, le nombre de grappes de fruits, le nombre de feuilles en fonction du temps.

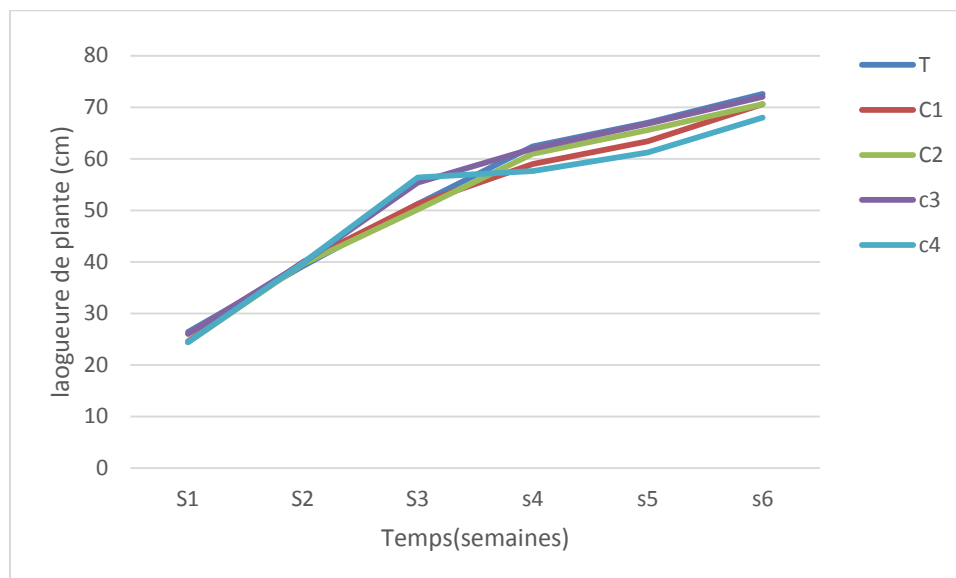


Figure 28 : Évolution de la hauteur de la plante (cm) en fonction du temps chez la tomate sous différentes concentrations de nanoparticules

La figure 28 représente L'évolution de la hauteur des plants de tomate Celia montre un effet biostimulant positif des nanoparticules. Toutes les concentrations testées (C1, C2, C3, C4) présentent une croissance supérieure au témoin, avec une amélioration de 4 à 6%. Les concentrations C1, C2 et C3 affichent les meilleures performances avec des hauteurs finales similaires d'environ 70-71 cm, tandis que le témoin atteint seulement 67 cm. La concentration C4 montre une performance légèrement inférieure aux autres traitements, suggérant un possible effet de saturation ou de stress à haute concentration.

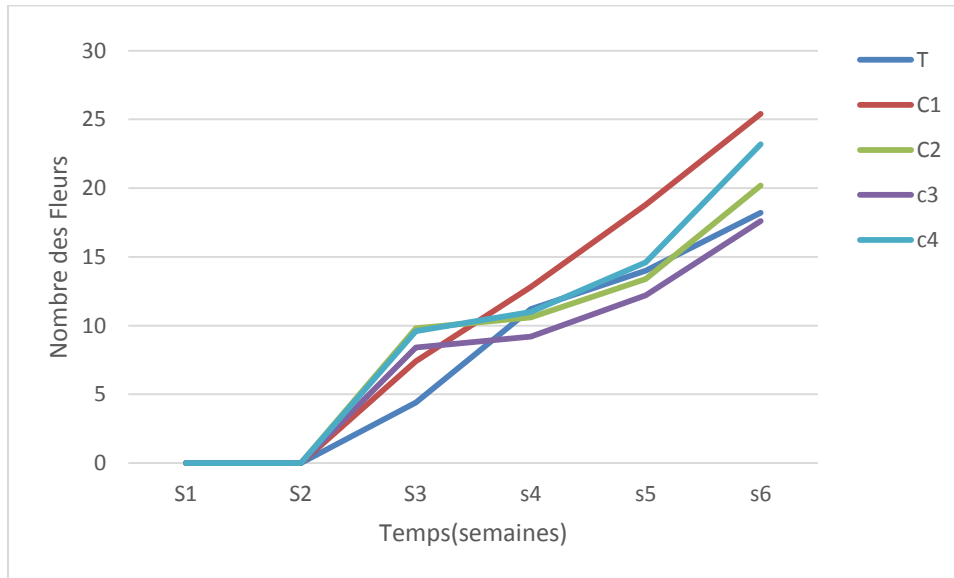


Figure 29 : Évolution du nombre de feuilles composées en fonction du temps chez la tomate sous différentes concentrations de nanoparticules

La figure 29 représente le développement foliaire présente une tendance inverse à la croissance en hauteur. Le témoin produit le plus grand nombre de feuilles composées (~31), suivi de près par C1 (~29). Les concentrations C2, C3 et C4 montrent une réduction significative du nombre de feuilles (25-26), indiquant que l'application de nanoparticules à concentrations élevées peut modifier l'architecture de la plante en favorisant l'élongation au détriment de la ramification foliaire.

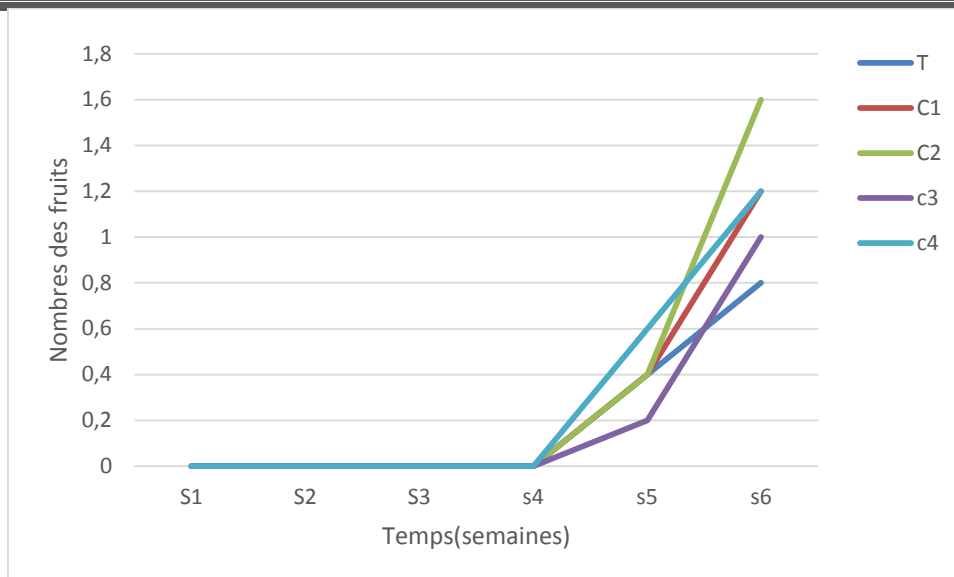


Figure 30 : Évolution du nombre de grappes de fruits en fonction du temps chez la tomate sous différentes concentrations de nanoparticules.

La figure 30 représente la formation des grappes florales révèle un impact négatif des nanoparticules sur le développement reproducteur. Le témoin présente la meilleure performance avec 1,5 grappes, tandis que tous les traitements montrent une diminution progressive. C1 maintient une performance acceptable (1,1 grappes), mais C2, C3 et C4 affichent une réduction marquée (0,7-0,8 grappes). Cette tendance suggère que l'énergie de la plante est réorientée vers la croissance végétative au détriment de la reproduction.

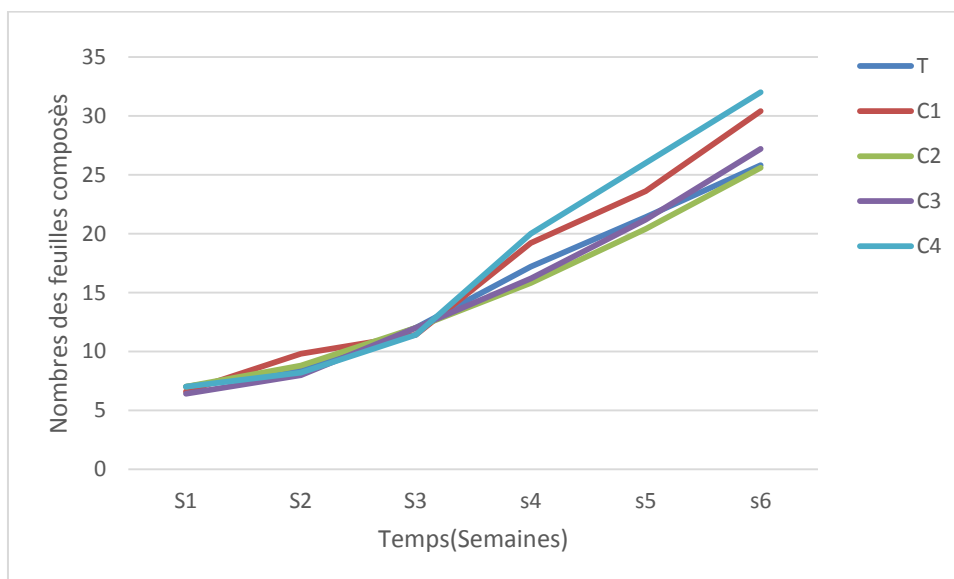


Figure 31 : Évolution du nombre de fleurs en fonction du temps chez la tomate sous

différentes concentrations de nanoparticules

La figure 31 représente la floraison montre un pattern différent des autres paramètres. Paradoxalement, C1 stimule significativement la production florale (25 fleurs) comparé au témoin (22 fleurs), tandis que C2 et C4 maintiennent des niveaux acceptables (18-20 fleurs). Seule C3 présente une floraison réduite (17 fleurs). Cette observation contrebalance partiellement les résultats négatifs sur les grappes, suggérant que certaines concentrations peuvent stimuler la floraison tout en affectant la formation des grappes.

Note : T = Témoin, C1-C4 = Concentrations croissantes de nanoparticules, S1-S6 = Semaines d'observation

IV. Dosage de la chlorophylle (a, b et totale) et les caroténoïdes dans les feuilles de plante

Afin d'évaluer l'effet des nanoparticules de ZnO sur l'appareil photosynthétique de la tomate, les teneurs en pigments photosynthétiques (chlorophylle a, chlorophylle b, chlorophylle totale) ainsi qu'en caroténoïdes ont été déterminées. Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus pour les différents traitements (C1, C2, C3, C4) comparés au témoin (T). Les résultats sont résumés dans le tableau 05 et illustrés dans la figure 32.

Tableau 05 : Dosage de la chlorophylle a, b et totale ainsi que les caroténoïdes (mg/g) en présence des NPs de ZnO

	Chlorophylle a	Chlorophylle b	Chlorophylle Totale	Caroténoïdes
C1(100mg/l)	14,413	5,676	20,08312	60,217
C2(50mg/l)	7,743	2,974	10,741	44,4161
C3(25mg/l)	6,729	1,624	6,013	26,217
C4(12.5mg/l)	6,264	5,885	12,14625	65,3625
Témoin	2,767	3,383	6,14914	26,47813

L'analyse de nos données montre que tous les traitements avec les nanoparticules de ZnO (C1, C2, C3, C4) ont entraîné une augmentation des pigments photosynthétiques (chlorophylle

a, b, totale et caroténoïdes) par rapport au témoin (T). Cela confirme que l'apport foliaire en ZnO-NPs stimule le métabolisme photosynthétique de la tomate.

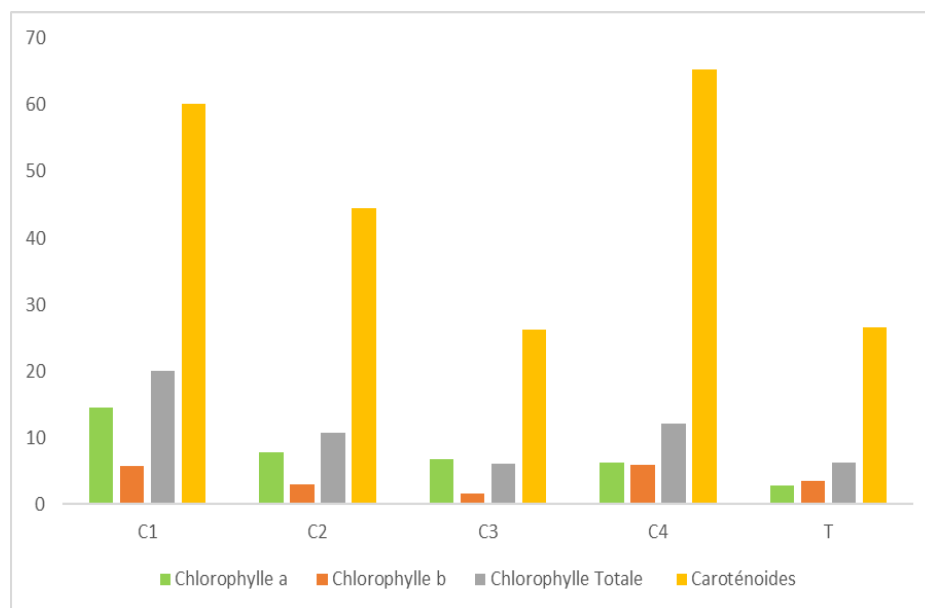


Figure 32 : Taux de la chlorophylle a, b et totale ainsi que les caroténoïdes (mg/g) en présence des NPs de ZnO

Ceci peut être expliquer par :

1. Effet du Zn sur la chlorophylle

Le zinc est un cofacteur enzymatique essentiel à la biosynthèse de la chlorophylle. L'augmentation observée, surtout pour la chlorophylle a (impliquée dans les centres réactionnels des photosystèmes), suggère une amélioration de l'efficacité de la conversion de l'énergie lumineuse. La chlorophylle b (antennes collectrices) progresse également, mais de manière plus modérée.

2. Effet sur les caroténoïdes

Leur augmentation est marquée, ce qui peut avoir deux explications complémentaires :

- Effet protecteur : les caroténoïdes piègent les radicaux libres et protègent les chloroplastes contre un éventuel stress oxydatif lié aux NPs.
- Effet physiologique : ils participent à l'absorption de la lumière et renforcent la stabilité des photosystèmes.

3. Différences entre traitements (C1 > C2, C3, C4)

Le traitement C1 induit la meilleure réponse pigmentaire, ce qui laisse penser que cette dose correspond à une concentration optimale de ZnO-NPs. Les traitements C2, C3 et C4, bien qu'efficaces par rapport au témoin, montrent des réponses plus faibles, probablement à cause : d'un effet dose-dépendant : trop faible → stimulation limitée, trop élevée → début de stress, ou de la saturation des mécanismes d'absorption foliaire.

Nos résultats montrent que la pulvérisation foliaire de ZnO-NPs améliore nettement la teneur en pigments

photosynthétiques chez la tomate. L'effet est dose-dépendant, avec un maximum au traitement C1, suggérant que cette dose représente le meilleur compromis entre stimulation métabolique et absence de stress. L'augmentation plus marquée des caroténoïdes souligne en parallèle l'activation de mécanismes protecteurs face à l'effet des nanoparticules.

Discussion

Les résultats de la présente étude confirment l'activité antifongique des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO) contre divers champignons pathogènes. Plusieurs travaux antérieurs ont déjà rapporté l'efficacité de ces nanomatériaux en raison de leurs propriétés physico-chimiques particulières, notamment leur taille nanométrique, leur surface spécifique élevée et leur potentiel de libération d'ions métalliques (Raghupathi et al., 2011 ; Siddiqi et al., 2018).

L'un des mécanismes les plus fréquemment évoqués est la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) induite par les ZnO-NPs. Ces ROS, incluant les radicaux hydroxyles ($\bullet\text{OH}$), les anions superoxydes (O_2^-) et le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), provoquent des dommages oxydatifs aux membranes, aux protéines et à l'ADN des cellules fongiques (Premanathan et al., 2011 ; Sirelkhatim et al., 2015). Ce stress oxydatif contribue de manière significative à l'inhibition de la croissance et à la perte de viabilité des cellules.

Par ailleurs, le contact direct entre les ZnO-N et la paroi fongique entraîne des perturbations structurales. Des observations microscopiques ont montré des altérations de la morphologie cellulaire, des pertes de l'intégrité membranaire et une fuite du contenu cytoplasmique, suggérant un effet mécanique lié à l'adhésion et à la pénétration des particules (Emami-Karvani & Chehrazi, 2011 ; Azam et al., 2012).

Un autre mécanisme proposé est la libération d'ions Zn^{2+} , susceptibles de perturber le métabolisme cellulaire en interférant avec certaines enzymes et protéines intracellulaires (Dimapilis et al., 2018).

Il convient toutefois de souligner que l'efficacité antifongique des ZnO dépend de plusieurs facteurs : concentration appliquée, taille et morphologie des particules, ainsi que conditions du milieu (Raghupathi et al., 2011). À fortes concentrations, une inhibition marquée est observée, mais la toxicité potentielle vis-à-vis des cellules hôtes ou de l'environnement reste une limite importante à considérer pour des applications biomédicales et agricoles (Sirelkhatim et al., 2015 ; Siddiqi et al., 2018).

Ainsi, bien que les ZnO représentent une alternative prometteuse pour le contrôle des champignons pathogènes, des investigations complémentaires, notamment *in vivo*, sont nécessaires pour préciser leur innocuité, leur mode d'action exact et les conditions optimales d'utilisation.

L'évolution de la hauteur des plants de tomate (Figure 28) sous l'effet des différentes concentrations de nanoparticules révèle un effet biostimulant positif. Toutes les concentrations testées présentent une croissance supérieure au témoin, avec une amélioration notable de 4 à 6%. Les traitements C1, C2 et C3 affichent les meilleures performances avec des hauteurs finales similaires d'environ 70-71 cm, tandis que le témoin atteint seulement 67 cm.

La concentration C4 montre une performance légèrement inférieure aux autres traitements, suggérant un possible effet de saturation ou de stress à haute concentration. Cette stimulation de la croissance s'explique par l'amélioration de l'efficacité photosynthétique résultant de l'apport de zinc, cofacteur essentiel dans de nombreux processus enzymatiques. L'optimisation du métabolisme photosynthétique se traduit par une production accrue d'assimilats, favorisant ainsi l'élongation cellulaire et la croissance végétative globale.

Le développement foliaire présente une tendance inverse à la croissance en hauteur. Le nombre de feuilles composées diminue avec l'augmentation des concentrations de nanoparticules, passant d'environ 31 feuilles pour le témoin à 29 pour C1, et 25-26 pour les concentrations C2, C3 et C4. Cette réduction du nombre de feuilles indique une réallocation énergétique où les plantes privilégient la croissance en hauteur au détriment de la ramification foliaire. Cette modification de l'architecture végétale peut être interprétée comme une stratégie adaptative optimisant l'interception lumineuse par unité de biomasse investie. En conditions de culture intensive où la densité de plantation est élevée, cette réorientation vers la croissance verticale peut s'avérer bénéfique pour la compétition lumineuse entre plants.

La formation des grappes florales (Figure 30) révèle un impact négatif des nanoparticules sur le développement reproducteur précoce. Le témoin présente la meilleure performance avec 1,5 grappes, suivi de près par C1 avec 1,1 grappes. Les concentrations C2, C3 et C4 montrent une réduction marquée avec 0,7-0,8 grappes par plant. Cette diminution progressive suggère que l'énergie de la plante est réorientée vers la croissance végétative au détriment de la reproduction.

Cette réallocation énergétique peut s'expliquer par plusieurs facteurs : la priorité métabolique donnée à l'établissement d'une structure végétative robuste, l'induction d'un stress léger aux concentrations élevées retardant la transition reproductrice, ou encore une optimisation adaptative privilégiant le développement végétatif avant l'investissement reproducteur. En production industrielle, cette tendance peut être bénéfique pour obtenir des plants plus vigoureux avant la mise à fruit, bien qu'un suivi à long terme soit nécessaire pour évaluer l'impact sur le rendement final.

L'analyse des pigments photosynthétiques (Figure 32) confirme l'effet biostimulant des nanoparticules de ZnO. Tous les traitements montrent une augmentation significative des teneurs en chlorophylle a, b, totale et caroténoïdes par rapport au témoin. Le traitement C1 présente les performances les plus remarquables avec des concentrations élevées en chlorophylle a et caroténoïdes, tandis que C4 affiche des valeurs équilibrées entre chlorophylle

a

et

b.

L'augmentation de la chlorophylle a, impliquée dans les centres réactionnels des photosystèmes,

suggère une amélioration de l'efficacité de conversion de l'énergie lumineuse. L'accumulation marquée des caroténoïdes révèle un double mécanisme : d'une part, une fonction protectrice contre le stress oxydatif potentiel lié aux nanoparticules, et d'autre part, un renforcement de la capacité d'absorption lumineuse et de la stabilité des photosystèmes.

Le zinc agit comme cofacteur enzymatique essentiel dans la biosynthèse de la chlorophylle, particulièrement dans l'activité de l'acide δ -aminolévulinique déshydratase. L'apport contrôlé de zinc sous forme nanoparticulaire optimise cette voie métabolique, expliquant l'augmentation observée des pigments photosynthétiques. Cette stimulation de l'appareil photosynthétique constitue le mécanisme primaire sous-tendant les améliorations de croissance observées.

Conclusion générale

Conclusion

Dans un contexte où l'optimisation des performances agricoles et la réduction de l'usage des produits phytosanitaires chimiques deviennent des priorités, cette étude a permis d'évaluer les effets biostimulants et antifongiques des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO-NPs) sur la tomate industrielle, ainsi que leur activité contre le champignon phytopathogène *Fusarium sp.* Les essais in vitro ont démontré que les nanoparticules de ZnO présentent un pouvoir antifongique remarquable avec une efficacité inhibitrice dose-dépendante, la vitesse de croissance mycélienne passant de 3,91 cm pour le témoin à 0,05 cm pour la concentration maximale, atteignant près de 100% d'inhibition.

Les essais in vivo, réalisés sur plants de tomate traités par pulvérisation foliaire, ont confirmé ces résultats en révélant une stimulation significative des pigments photosynthétiques et de la croissance végétative. Le traitement C1 s'est révélé optimal, induisant les plus fortes concentrations en chlorophylle a (14,413 mg/g) et caroténoïdes (60,217 mg/g) comparativement au témoin (2,767 mg/g et 26,478 mg/g respectivement), tout en améliorant la hauteur des plants de 4 à 6%. Cette concentration optimale s'est montrée plus performante que les concentrations plus élevées qui présentaient des signes de saturation physiologique. En somme, les nanoparticules de ZnO étudiées constituent une alternative prometteuse aux intrants chimiques conventionnels, combinant stimulation photosynthétique, promotion de la croissance et protection antifongique naturelle.

Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour le développement d'une agriculture de précision plus durable, respectueuse de l'environnement et contribuant à l'amélioration des performances végétales par l'innovation nano technologique.

Références bibliographiques

- Ali N., Réthoré E., Yvin J.-C., Hosseini S.A. *The regulatory role of silicon in mitigating plant nutritional stresses. Plants.* 2020;9:1779
- Al-Burki H.A., Al-Ajeel S.A. *Effect of bio-fertilizer and nanoscale elements on root nodules formation and their chemical content of two Phaseolus vulgaris l varieties. Plant Arch.* 2021;21:1476–1480.
- Agri U., Chaudhary P., Sharma A. *In vitro compatibility evaluation of agrivable nanochitosan on beneficial plant growth-promoting rhizobacteria and maize plant. Natl. Acad. Sci. Lett.* 2021;44:555–559.
- Ahmadi-Majd M., Nejad A.R., Mousavi-Fard S., Fanourakis D. *Postharvest application of single, multi-walled carbon nanotubes and nanographene oxide improves rose keeping quality. J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 2021:1–15.
- Ahmed B., Syed A., Rizvi A., Shahid M., Bahkali A.H., Khan M.S., Musarrat J. *Impact of metal-oxide nanoparticles on growth, physiology and yield of tomato (Solanum lycopersicum L.) modulated by Azotobacter salinestris strain ASM. Environ. Pollut.* 2021;269:116218.
- Anonyme, 2009. *La tomate : un aliment diététique riche en eau, pauvre en calories et riche en éléments minéraux et vitamines (A.C.E).*
- Agrios, G.N., 2005. *Plant Pathology.* 5th ed. Elsevier Academic Press, USA UK.
- Akhavan Hezaveh T., Rahmani F., Alipour H., Pourakbar L. *Effects of foliar application of ZnO nanoparticles on secondary metabolite and micro-elements of camelina (Camelina sativa L.) under salinity stress. J. Stress Physiol. Biochem.* 2020;16:54–69.
- Armstrong, GM. Armstrong, JK. 1981. “Formae speciales and races of *Fusarium oxysporum* causing wilt diseases”, in: Nelson, P.E., Toussoun, T.A. and Cook, R.J. (Eds.) *Fusarium: Diseases, Biology, and Taxonomy*, The Pennsylvania State University Press, University Park, PA, USA: 391-399.
- Bibi F., Ilyas N., Arshad A., Khalid A., Saeed M., Ansar S., Batley J. *Formulation and efficacy testing of bio-organic fertilizer produced through solid-state fermentation of agro-waste by Burkholderia cenocepacia. Chemosphere.* 2022;291:132762.
- Blancard, D. 1997. *Les maladies de la tomate.* Edition INRA, Paris, 212 P.
- Bhari R., Kaur M., Singh R.S. *Chicken feather waste hydrolysate as a superior biofertilizer in agroindustry. Curr. Microbiol.* 2021;78:2212–2230.
- Blancard, D., Laterrot, H., Marchoux, G. et Candresse, T., 2009. *Les maladies de la*

tomate : identifier connaître maîtriser. Ed. Quæ. Paris. 679 pp.

- Blanchard, D, Laterrot H., Marchoux G. et Candresse , T. 2012. A colour Handbook – Tomato Diseases : identification, biology and control. Manson Publishing Ltd, 688p.
- Bouchot, D., Rouxel, F., Louvet, J. 1972. Premières observations de la *Fusarium* vasculaire de la tomate en France. Ann. Phytopath. 4(2) : 187-191.
- Blancard D. 1988. Les maladies de la tomate, observée, identifié, lutté. Edition : INRA. Paris. 210 p.
- Blancard D. 2009. Les maladies de la tomate, identifier, connaitre, maitriser. Edition Quæ. Paris. 691 p.
- Botton, B., Breton, A., Fèvre, M., Gauthier, S., Guy, P., Larpent, J P.,Reymond, P Anglier. J., Vayssier, Y., Veau, P.1990 Moisissures utiles et nuisibles, Importance, industrielle, Ed. Masson, Paris.
- .Boroumand N., Behbahani M., Dini G. Combined effects of phosphate solubilizing bacteria and nanosilica on the growth of land cress plant. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2020;20:232–243
- .Baddour A.G., Attia R.H. Effect of foliar application with nano-micronutrients and organic fertilization on snap bean under sandy soil condition. *J. Soil Sci. Agric. Eng.* 2021;12:25–32.
- Caubet M., Cornu S., Saby N.P.A., Meunier J.-D. Agriculture increases the bioavailability of silicon, a beneficial element for crop, in temperate soils. *Sci. Rep.* 2020;10:19999
- Chaudhary P., Khati P., Chaudhary A., Maithani D., Kumar G., Sharma A. Cultivable and metagenomic approach to study the combined impact of nanogypsum and *Pseudomonas taiwanensis* on maize plant health and its rhizospheric microbiome. *PLoS ONE.* 2021;16:e0250574.
- Di Pietro, A. Madrid, MP. Caracuel, Z. Delgado-Jarana, J, Roncero, MIG., 2003.*Fusarium oxysporum* :exploring the molecular arsenal of a vascular wilt fungus *Molecular Plant Pathology*(4): 315-325.
- DSA 2018 (Direction des services agricoles), Wilaya de Chlef (2017-2018).
- EzzahiriB., 2001.Les maladies du Blé Identification, facteurs de développement et méthodes de lutte (Bultin Mensuel d’information et de liaison du PNTTA)N°77.
- Enrico J.M., Piccinetti C.F., Barraco M.R., Agosti M.B., Ecclesia R.P., Salvagiotti F. Biological nitrogen fixation in field pea and vetch: Response to inoculation and residual effect on maize in the Pampean region. *Eur. J. Agron.* 2020;115:126016.

- El akel M., CHOUIBANI M. ET KAACK H. 2001. Protection intégrée en culture de tomate Integrated Pest Management Review. 1 : Pp15-29.
- Emberger L, 1960 .Traite botanique .Fascicule II maison.p335.
- Ebrahiminezhad A., Zare-Hoseinabadi A., Sarmah A.K., Taghizadeh S., Ghasemi Y., Berenjian A. *Plant-mediated synthesis and applications of iron nanoparticles. Mol. Biotechnol.* 2017;60:154–168.
- Fravel, D., Olivain, C., & Alabouvette, C. 2003. *Fusarium oxysporum* and its biocontrol. *New phytologist*, 157(3), 493-502.
- Faostat. 2023. Données de production agricole de l'Algérie. Ed. FAO.
- Fatima A., Singh S., Prasad S.M. *Sustainable Agriculture Reviews. Springer; Cham, Switzerland: 2020. Interaction between copperoxide nanoparticles and plants: Uptake, accumulation and phytotoxicity; pp. 143–161.*
- Gindrat, D. 1975. La fusariose vasculaire de la tomate de plein champ en Suisse. *Revue suisse de viticulture arboriculture horticulture* 7 (2) : 69-72.
- Guenaoui Y., 2008-Première observation de la mineuse de la tomate invasive, dans la région de Mostaganem, au printemps 2008. *Phytoma*, N° :617, p.p.18-19.
- Gahoi P., Omar R.A., Verma N., Gupta G.S. *Rhizobacteria and Acylated homoserine lactone-based nanobiofertilizer to improve growth and pathogen defense in Cicer arietinum and Triticum aestivum Plants. ACS Agric. Sci. Technol.* 2021;1:240–252
- Guinochet T., 1973. *Phytosociologie*, Ed. Masson, France, 227p.
- Greger M., Landberg T., Vaculík M. *Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. Plants.* 2018;7:41.
- Haglund, W.A, Kraft, J .M., 2001. *Fusarium wilt. In "Compendium of Pea Diseases Pests and Diseases"*, (Eds. Kraft, J.M., Pflieger, F.L.) American Phytopathological Society Press, St. Paul, USA, 13.
- Herlekar M., Barve S., Kumar R. *Plant-mediated green synthesis of iron nanoparticles. J. Nanoparticles.* 2014;2014:140614.
- Han Y.-Q., Wen J.-H., Peng Z.-P., Zhang D.-Y., Hou M.-L. *Effects of silicon amendment on the occurrence of rice insect pests and diseases in a field test. J. Integr. Agric.* 2018;17:2172–2181
- Helaly M.N., El-Hoseiny H., El-Sheery N.I., Rastogi A., Kalaji H.M. *Regulation and physiological role of silicon in alleviating drought stress of mango. Plant Physiol. Biochem.*

2017;118:31–44.

- Kusale S., Attar Y., Sayyed R., Malek R., Ilyas N., Suriani N., Khan N., El Enshasy H. Production of plant beneficial and antioxidants metabolites by *Klebsiellavariicola* under salinity stress. *Molecules*. 2021;26:1894.
- Kalam S., Basu A., Ahmad I., Sayyed R.Z., El-Enshasy H.A., Dailin D.J., Suriani N.L. Recent understanding of soil acidobacteria and their ecological significance: A critical review. *Front. Microbiol.* 2020;11:580024.
- Pérez-de-Luque A. Interaction of nanomaterials with plants: What do we need for real applications in agriculture? *Front. Environ. Sci.* 2017;5:12. doi: 10.3389/fenvs.2017.00012.
- Iñaki, G. 2015. *Botrytis cinerea* Un ravageur de culture très infectieux CANNA Gardening CANADA.htm.<http://H:/Symtomes>.
- Ito, S. I., Ihara, T., Tamura, H., Tanaka, S., Ikeda, T., kajihara, H ... & El-Sayed, M.A. 2007 α -Tomatine, the major saponin in tomato, induces programmed cell death mediated by reactive oxygen species in the fungal pathogen *Fusarium oxysporum*. *FEBS letters*, 581(17), 3217-3222.
- Jahangir S., Javed K., Bano A. Nanoparticles and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) modulate the physiology of onion plant under salt stress. *Pak. J. Bot.* 2020;52:1473–1480.
- Logrieco A., Moretti A. et Solfrizzo M., 2009. *Alternaria* toxins and plant diseases: an overview of origin, occurrence and risks. *World Mycotoxin Journal*. 2 (2): 129-140.
- López-Vargas E.R., Ortega-Ortíz H., Cadenas-Pliego G., de Alba Romenus K., Cabrera de la Fuente M., Benavides-Mendoza A., Juárez-Maldonado A. Foliar application of copper nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. *Appl. Sci.* 2018;8:1020.
- Lafmejani Z.N., Jafari A.A., Moradi P., Moghadam A.L. Impact of foliar application of copper sulphate and copper nanoparticles on some morpho-physiological traits and essential oil composition of peppermint (*Mentha piperita* L.) *Herba Pol.* 2018;64:13–24.
- Ma D., Sun D., Wang C., Ding H., Qin H., Hou J., Huang X., Xie Y., Guo T. Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. *Front. Plant Sci.* 2017;8:860.
- Martin, Hilmi., Barbara, Van Dam., 2005. La culture de la tomate production, transformation et commercialisation.
- Messiaen, C.M. 1981. Les variétés résistantes. Méthodes de lutte contre les maladies et

ennemies des plantes. Edition INRA, Paris. 374 p.

- Messiaen CM., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R., 1991. Les maladies des plantes maraichères, INRA. Paris, 552p.
- Mahapatra D.M., Satapathy K.C., Panda B. *Biofertilizers and nanofertilizers for sustainable agriculture: Phycoprosects and challenges. Sci. Total Environ.* 2022;803:149990.
- Michielse C.B. Rep M. 2009. Pathogen profile update: *Fusarium oxysporum*. *Molecular Plant Pathology*, 10 (3): 311-324.
- Mémento de l'agronome. 2003. GRET et CIRAD, Éditions Quae, France.
- McGinnity P. *Silicon and Its Role in Crop Production.* 2015. [(accessed on 10 March 2022)].
- Mahawar H., Prasanna R., Gogoi R., Singh S.B., Chawla G., Kumar A. *Synergistic effects of silver nanoparticles augmented Calothrix elenkinii for enhanced biocontrol efficacy against Alternaria blight challenged tomato plants. 3 Biotech.* 2020;10:102.
- Mozafari A.A., Havas F., Ghaderi N. *Application of iron nanoparticles and salicylic acid in in vitro culture of strawberries (Fragaria × ananassa Duch.) to cope with drought stress. Plant Cell Tissue Organ Cult. (PCTOC)* 2018;132:511–523.
- Nejatizadeh F. *Effect of silver nanoparticles on salt tolerance of Satureja hortensis l. during in vitro and in vivo germination tests. Heliyon.* 2021;7:e05981.
- Öktem M., Keleş Y. *The role of silver ions in the regulation of the senescence process in Triticum aestivum. Turk. J. Biol.* 2018;42:517–526.
- Patterson C.L., 1991. Importance of chlamydo spores as primary inoculum for *Alternaria solani* incitant of collar rot earlyblight of tomato. *Plant Disease.* 75:274-278.
- Panichikkal J., Prathap G., Nair R.A., Krishnankutty R.E. *Evaluation of plant probiotic performance of Pseudomonas sp. encapsulated in alginate supplemented with salicylic acid and zinc oxide nano-particles. Int. J. Biol. Macromol.* 2021;166:138–143.
- Paschalidis K., Fanourakis D., Tsaniklidis G., Tzanakakis V.A., Biliadis F., Samara E., Kalogiannakis K., Debouba F.J., Ipsilantis I., Tsoktouridis G., et al. *Pilot cultivation of the vulnerable cretan endemic Verbascum arcturus L. (scrophulariaceae): Effect of fertilization on growth and quality features. Sustainability.* 2021;13:14030.
- Pezet R., Viret O. et Gindro K. 2004. Plant-microbe interaction: the Botrytis greymould of grapes biology, biochemistry, epidemiology and control management. In: *Advances in Plant Physiology* (Hemantaranjan A., ed), Scientific publishers, Jodhpur, India, 7, 71-116.

- Panichikkal J., Puthiyattil N., Raveendran A., Nair R.A., Krishnankutty R.E. Application of encapsulated *Bacillus licheniformis* supplemented with chitosan nanoparticles and rice starch for the control of *Sclerotium rolfsii* in *Capsicum annuum* (L.) seedlings. *Curr. Microbiol.* 2021;78:911–919.
- Rahman A., Al Jabri A.B., Jassim R.A.H., Jabar A.K. The effect of nano nitrogen and bio-fertilizer types on npk concentration in soil and okra plant. *Plant Arch.* 2020;20:4031–4037.
- Rasouli H., Popović-Djordjević J., Sayyed R.Z., Zarayneh S., Jafari M., Fazeli-Nasab B. *Sustainable Agriculture Reviews*. Springer; Cham, Switzerland: 2020. Nanoparticles: A new threat to crop plants and soil rhizobia? pp. 201–214.
- Saboor A., Ali M., Ahmed N., Skalicky M., Danish S., Fahad S., Hassan F., Hassan M., Brestic M., EL Sabagh A., et al. Biofertilizer-based zinc application enhances maize growth, gas exchange attributes, and yield in zinc-deficient soil. *Agriculture.* 2021;11:310.
- Semida W., Abdelkhalik A., Mohamed G., El-Mageed T.A., El-Mageed S.A., Rady M., Ali E. Foliar application of zinc oxide nanoparticles promotes drought stress tolerance in eggplant (*Solanum melongena* L.) *Plants.* 2021;10:421.
- Singh P., Ghosh D., Manyapu V., Yadav M., Majumder S. Synergistic impact of iron (iii) oxide nano-particles and organic waste on growth and development of *Solanum lycopersicum* plants: New paradigm in nanobiofertilizer. *Plant Arch.* 2019;19:339–344
- Sharma A., Patel S., Menghani E. Synthesis, application and prospects of nano-biofertilizers: A reappraisal. *J. Phytol. Res.* 2021;34:79–85.
- Soliman M., Qari S.H., Abu-Elsaoud A., El-Esawi M., Alhaithloul H., Elkelish A. Rapid green synthesis of silver nanoparticles from blue gum augment growth and performance of maize, fenugreek, and onion by modulating plants cellular antioxidant machinery and genes expression. *Acta Physiol. Plant.* 2020;42:148.
- Shankara Naika, 2005. Agromisa Foundation and CTA, Wageningen, AGRODOK 17, Cultivation of tomato production, processing and marketing. Pg. 6-8.
- Si Mohammed, A. 2016. Caractérisation Et Lutte Biologique Vis-à-vis *Fusarium oxysporum* (Doctoral Dissertation, Université D'oran1-Ahmed Ben Bella).P:124.
- Shafiei-Masouleh S.-S. Use of magnetic nano-chitosan as bio-fertilizer to reduce production period in three cyclamen cultivars. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2021;22:281–293.

- Shabbir Z., Sardar A., Shabbir A., Abbas G., Shamshad S., Khalid S., Natasha, Murtaza G., Dumat C., Shahid M. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. *Chemosphere*. 2020;259:127436.
- Saberi-Rise R., Moradi-Pour M. The effect of *Bacillus subtilis* Vru1 encapsulated in alginate-bentonite coating enriched with titanium nanoparticles against *Rhizoctonia solani* on bean. *Int. J. Biol. Macromol.* 2020;152:1089–1097.
- Simmons EG., 2007. *Alternaria*. An Identification Manual. : CBS Biodiversity SeriesNo. 6. CBS Fungal Biodiversity Centre, Utrecht, the Netherlands, 775p.
- Snehal S., Lohani P. Silica nano-particles: Its green synthesis and importance in agriculture. *J. Pharmacogn. Phytochem.* 2018;7:3383–3393.
- Tripathi D.K., Singh S., Singh V.P., Prasad S.M., Chauhan D.K., Dubey N.K. Silicon nanoparticles more efficiently alleviate arsenate toxicity than silicon in maize cultivar and hybrid differing in arsenate tolerance. *Front. Environ. Sci.* 2016;4:46.
- Vafa Z., Sohrabi Y., Sayyed R., Suriani N.L., Datta R. Effects of the combinations of rhizobacteria, mycorrhizae, and seaweed, and supplementary irrigation on growth and yield in wheat cultivars. *Plants*. 2021;10:811
- Vedamurthy A.B., Bhattacharya S., Das A., Shruthi S.D. *Advances in Nano-Fertilizers and Nano-Pesticides in Agriculture*. Elsevier; Amsterdam, The Netherlands: 2021. Exploring nanomaterials with rhizobacteria in current agricultural scenario; pp. 487–503.
- Vaghar M.S., Sayfzadeh S., Zakerin H.R., Kobraee S., Valadabadi S.A. Foliar application of iron, zinc, and manganese nano-chelates improves physiological indicators and soybean yield under water deficit stress. *J. Plant Nutr.* 2020;43:2740–2756
- Yasmeen F., Razzaq A., Iqbal M.N., Jhanzab H.M. Effect of silver, copper and iron nanoparticles on wheat germination. *Int. J. Biosci.* 2015;6:112–117
- Azam, A., Ahmed, A. S., Oves, M., Khan, M. S., Habib, S. S., & Memic, A. (2012). Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria: A comparative study. *International Journal of Nanomedicine*, 7, 6003–6009.
- Dimapilis, E. A. S., Hsu, C. S., Mendoza, R. M. O., & Lu, M. C. (2018). Zinc oxide nanoparticles for water disinfection. *Sustainable Environment Research*, 28(2), 47–56.
- Emami-Karvani, Z., & Chehrazai, P. (2011). Antifungal properties of zinc oxide nanoparticles against *Aspergillus flavus* and *Candida albicans*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 165(3–4), 1274–1281.

- Premanathan, M., Karthikeyan, K., Jeyasubramanian, K., & Manivannan, G. (2011). Selective toxicity of ZnO nanoparticles toward Gram-positive bacteria and cancer cells by apoptosis through lipid peroxidation. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 7(2), 184–192.
- Raghupathi, K. R., Koodali, R. T., & Manna, A. C. (2011). Size-dependent bacterial growth inhibition and mechanism of antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles. *Langmuir*, 27(7), 4020–4028.
- Siddiqi, K. S., ur Rahman, A., & Tajuddin, A. H. (2018). Properties of zinc oxide nanoparticles and their activity against microbes. *Nanoscale Research Letters*, 13(1), 141.
- Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N. H. M., Ann, L. C., Bakhori, S. K. M., Hasan, H., & Mohamad, D. (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-Micro Letters*, 7(3), 219–242
- Zahedi S.M., Moharrami F., Sarikhani S., Padervand M. *Selenium and silica nanostructure-based recovery of strawberry plants subjected to drought stress. Sci. Rep. 2020;10:17672.*

Annexe

Annexe I

- **Composant de la formulation biologique :**

- eau distillée.

-huile essentielle de Romarin.

-huile essentielle de Bigarade.



- **Composition des milieux de culture :**

- Milieu PDA :

-200g de pomme de terre.

-20g de glucose.

-20g d'Agar.

-Eau distillée : compléter à 1000 ml.

-Stérilisation : à 120c pendant 20 mn.

