

République Algérienne Démocratique Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université  
Saad Dahleb Blida 1  
Faculté des sciences de la nature et de la vie  
Département Biotechnologie

Mémoire de fin d'études  
En vue de l'obtention du diplôme de  
Master  
Option : Biotechnologie microbienne

## Thème

**Biocontrôle de la fusariose vasculaire de  
la tomate causée par *Fusarium  
oxysporum***

***f.sp. lycopersici***

Présenté par : DJAFFRI Sofia et KHELIFA Manel

Soutenu devant le jury :

M <sup>lle</sup> . Sabri K.	MAA	USDB 1	Présidente M <sup>me</sup> . Bensaïd
F.	MAA	USDB 1	Promotrice M <sup>lle</sup> Mekhladi D.
Doctorante USDB 1		Examinatrice	

Année universitaire 2019/2020

## Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail :

A l'homme de ma vie, mon cher papa **BOUALEM**, pour sa patience sans fin, son amour, sa compréhension et son encouragement. Son soutien fut une lumière dans tout mon parcours.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui a sacrifié pour moi et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : ma chère maman **RACHIDA**

Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Rien au monde ne vaut les efforts fournis par eux jour et nuit pour mon éducation et mon bien être

A mon adorable sœur **LINA**, pour sa tendresse, son amour et sa présence à mes côtés dans les bons et les mauvais moments tout au long de mes études

A ma chère amie et binôme **MANEL**, pour sa gentillesse, sa patience et sa compréhension

A ma tendre amie **AMIRA**, pour son amour, son soutien et son encouragement

A mon oncle **KARIM**, je ne le remercierai jamais assez pour son amabilité et son aide précieuse dans les moments difficiles

A celui que j'aime et qui m'a tant soutenu, aidé, et a toujours été là à m'encourager et à me conseiller, je le remercie pour l'amour et le bonheur dont il me comble chaque jour :

**HAMDI ABDELMOUMENE**

Ainsi qu'à toute la famille **DJAFFRI** et la famille **CHAOU** et à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

**SOFIA**

## Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études, et spécialement à ma maman qui m'a soutenu et supporté durant ces années d'études. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance et amour.

À ma chère amie et binôme **Sofia** pour son appui son encouragement et pour tous les moments agréables que nous avons passés ensemble.

À mes chères cousines pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral, leur présence à mes cotés à chaque moment,

À toute ma famille **Khelifa** et **Harouni** pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire

Une pensée particulière a mes très chères tentes maternelles **Sisa** et **Naima** pour leur soutien, encouragement et leur chaleureux accueil dans les périodes difficiles,

A toutes mes amies qui ont participé de près ou de moi dans l'élaboration de ce travail, à tous ceux que j'ai omis de citer,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

Merci d'être toujours là pour moi.

**Manel.**

## Remerciements

Nos remerciements les plus sincères et les plus chaleureux s'adressent : à  
ALLAH le plus puissant qui nous a permis d'être ce que nous sommes aujourd'hui.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre promotrice Madame  
Bensaid Fatiha, qui, par ses paroles, ses écrits, ses conseils et ses critiques a guidé  
nos réflexions durant notre rédaction.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos professeurs pour la qualité de  
l'enseignement qu'ils nous ont prodigué au cours de notre formation

Nos remerciements à Mme Benousaid pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de  
présider le jury qui va juger ce travail

Nous adressons nos remerciements à Mme Bechabane pour avoir

Acceptée d'examiner ce travail.

Un grand merci à toute personne qui a participé de près ou de loin, directement ou  
Indirectement, à la réalisation de ce travail.

## Biocontrôle de la fusariose vasculaire de la tomate causée par *Fusarium oxysporum*

### Résumé

Notre étude a porté sur la synthèse des connaissances récentes portant sur la diversité des microorganismes antagonistes et les modalités de biocontrôle de la fusariose vasculaire de la tomate. Actuellement plusieurs travaux ont souligné l'importance de l'expérimentation et de l'utilisation d'antagonistes microbiens naturels. Parmi les microorganismes les plus étudiés, quant à leur exploitation dans la lutte contre les fusarioses vasculaires. Nous citons particulièrement les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) comme *Pseudomonas* sp et *Bacillus* sp et les champignons favorisant la croissance des plantes (PGPF) tels que *Trichoderma* sp et *Fusarium* sp non pathogène. D'autres groupes ont montré des résultats satisfaisants représentés par plusieurs espèces bactériennes lactiques, cyanobactéries et mycorhizes.

Les effets bénéfiques de la bactérisation résultent à la fois des activités spécifiques des bactéries, de leur densité dans la rhizosphère de la plante-hôte, de leur grande affinité pour les exsudats racinaires, mais aussi par leur temps de génération relativement court. Les effets bénéfiques des rhizobactéries se présentent directement sur la plante, en stimulant sa physiologie et en améliorant sa croissance et/ou indirect par l'inhibition et l'élimination des effets néfastes de la flore racinaire pathogène. De part la variabilité des modes d'action obtenue par des utilisations individualisées, l'efficacité peut être améliorée par des effets additifs ou synergiques.

Compte tenu de la diversité et de la complexité des interactions entre la microflore, le sol et la plante, plus les mécanismes mis en œuvre seront variés plus l'efficacité de l'inoculation microbienne sera meilleure. Dans le but d'atteindre cet objectif, il est intéressant d'identifier les gènes associés aux mécanismes de biocontrôle, et de rendre les microorganismes antagonistes plus tolérants au stress abiotique de l'environnement. Dans l'ensemble, plusieurs agents antagonistes ont la potentialité d'utilisation sous forme de bioformulations commercialisables, ce qui constitue une alternative efficace à leurs adversaires chimiques tout en participant à la préservation et la restauration du sol

**Mots clés :** Biocontrôle, Fusariose vasculaire, *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*, alternative, agent antagoniste, tomate

**Biological control of Fusarium wilt of Tomato Caused by *Fusarium oxysporum* Abstract**

Our study focused on the synthesis of recent knowledge relating to the diversity of antagonist microorganisms and the methods of biocontrol of vascular fusarium wilt in tomato. Currently, several studies have emphasized the importance of the experimentation and the use of natural microbial antagonists. Among the most studied microorganisms, in terms of their use in the fight against vascular fusarioses. We particularly mention the Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) such as *Pseudomonas* sp and *Bacillus* sp and Plant Growth Promoting Fungy (PGPF) such as *Trichoderma* sp and non-pathogenic *Fusarium* sp. Other groups have shown satisfactory results such as lactic bacteria, cyanobacteria and mycorrhizae.

The beneficial effects of bacterization result both from the specific activities of the bacteria and their density in the rhizosphere of the host plant by their great affinity for root exudates, but also by their relatively short generation time. The beneficial effects of rhizobacteria occur directly on the plant, by stimulating its physiology and improving its growth and / or indirectly by inhibiting and eliminating the harmful effects of pathogenic root flora. Due to the variability of the modes of action obtained by individualized uses, the effectiveness can be improved by additive or synergistic effects. In the light of the diversity and complexity of the interactions between the microflora, the soil and the plant, the more the mechanisms involved are varied, the more efficient the microbial inoculation will be. In order to achieve this goal, it is interesting to identify genes associated with biocontrol mechanisms, and to make antagonist microorganisms more tolerant to abiotic stress from the environment.

Overall, the antagonists mentioned have been shown to have potential for use as marketable formulations in the biological control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, which constitutes an effective alternative to their chemical adversaries and participates in the preservation and restoration of the soil.

**Keywords:** Biocontrol, *Fusarium* wilt, *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*, alternative, antagonist, tomato

***Fusarium oxysporum* f.sp. المكافحة الحيوية لذبول الطماطم المسبب من طرف *lycopersic***

**الملخص**

ركزت دراستنا على توليف المعرفة الحديثة المتعلقة بتنوع الكائنات الدقيقة المضادة وطرق مكافحة الحيوية ضد ذبول الطماطم. أكدت العديد من الدراسات في الوقت الحالي على أهمية التجريب واستخدام مضادات الميكروبات الطبيعية. من بين الكائنات الدقيقة الأكثر دراسة، من حيث استخدامها في مكافحة ذبول الطماطم. نذكر بشكل خاص البكتيريا الجذرية التي تعزز نمو النبات (PGPR) مثل *Pseudomona sp* و *Bacillus sp* والفطريات المعززة لنمو النبات (PGPF) مثل *Fusarium sp* و *Trichoderma sp* كما أظهرت مجموعات أخرى نتائج مرضية مثل بكتيريا حمض اللاكتيك والبكتيريا الزرقاء والمتفطرات.

تنجم الآثار المفيدة للبكتيريا نتيجة الأنشطة الخاصة التي تقوم بها وكثافتها بجوار جذور النباتات المضيفة من خلال تقاربها العالي لإفرازات الجذور، ولكن أيضاً بسبب وقت تكاثرها القصير نسبياً. تحدث البكتيريا الجذرية التي تعزز نمو النبات تأثيرات مفيدة مباشرة على النبات، من خلال تحفيز فسيولوجيته وتحسين نموه و / أو بشكل غير مباشر عن طريق تثبيط وإزالة الآثار الضارة للكائنات الجذرية الدقيقة المسببة للأمراض. نظراً لتنوع آليات العمل التي تم الحصول عليها من خلال الاستخدامات الفردية، يمكن تحسين الفعالية عن طريق التأثيرات المضافة أو التآزرية.

نظراً لتنوع وتعقيد التفاعلات بين الكائنات الدقيقة والتربة والنبات، فكلما زاد تنوع الآليات المعنية، زادت فعالية التلقيح الميكروبي. من أجل تحقيق هذا الهدف، من المثير للاهتمام تحديد الجينات المرتبطة بآليات مكافحة الحيوية، وجعل الكائنات الدقيقة المضادة أكثر تحملاً للإجهاد اللاأحيائي للبيئة.

بشكل عام، ثبت أن المضادات المذكورة أعلاه لها إمكانية الاستخدام كتركيبات قابلة للتسويق في مكافحة البيولوجية لـ *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici*، التي تشكل بديلاً فعالاً لخصومها الكيميائيين وتشارك في الحفاظ على التربة واستعادتها.

**الكلمات المفتاحية:** مكافحة البيولوجية، ذبول الطماطم، *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici*، بديل، مضاد ، طماطم.

## Liste des abréviations

°C : degré Celsius

Ha: Hectare

Hg: Hectogramme

Fo: *Fusarium oxysporum*

Fol: *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*

VCG : vegetativecompatibility group

SRPVM : Station Régionale de la Protection des Végétaux de Misserghine

PME: Pectine Méthylestérase

PDA: Potato Dextrose Agar

PGPF: Plant Growth Promotion Fungi

PME: Pectine Méthyle Estérase

ISR: Induced Systemic Resistance

PGPR: Plant Growth Promotion Rizhobacteria

PGPM: Plant Growth Promotion Microorganism

PGP: Plant Growth Promotion

LAB: Lactic Acid Bacteria

## Liste des figures

Numéro	Titre	Page
01	Principaux producteurs de la tomate en Afrique	09
02	Répartition de la superficie nationale de la tomate en 2016	10

<b>03</b>	La production de tomate par wilaya en 2016	<b>10</b>
<b>04</b>	Identification de <i>Fusarium oxysporum f. sp. Lycopersici</i>	<b>18</b>
<b>05</b>	Colonies de <i>Fusarium oxysporum f. sp. Lycopersici</i> sur milieux	<b>19</b> PDA
<b>06</b>	Cycle de vie de <i>Fusarium oxysporum f.sp. lycopersici</i>	<b>22</b>
<b>07</b>	Symptômes de la fusariose vasculaire causé par le <i>Fusarium oxysporum. f sp. lycopersici</i>	<b>23</b>
<b>08</b>	Les principaux mécanismes d'action des PGPR	<b>28</b>
<b>09</b>	Effet qualitatif de <i>F. oxysporum</i> sur les plantes <i>L. esculentum</i> non traitées et capacité de bio protection des bactéries lactiques étudiées	<b>40</b>
<b>10</b>	Gauche - bio-amorçage des graines de tomates. Droite - <i>Pseudomonas aureofaciens</i> AB 254 sur la surface des poils des graines de tomate	<b>43</b>

## Liste des tableaux

<b>Numéro</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>01</b>	Groupes de compatibilité végétative (VCG) de <i>Fusarium oxysporum</i> répertoriés par formes spéciales	<b>16</b>
<b>02</b>	Les avantages et inconvénients des fongicides microbiens par rapport aux fongicides chimique	<b>26</b>
<b>03</b>	Les mécanismes d'action des PGPF contre la fusariose vasculaire de la tomate	<b>34</b>

## Table des matières

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
Liste des abréviations	
<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre I : étude bibliographique de la plante hôte</b>	
1. Historique.....	3
2. Description botanique.....	3 3.
Classification taxonomique.....	5 4.
Les variétés.....	5 4.1.
Selon le mode de fécondation.....	5
4.2. Selon le mode de croissance.....	6
5. Les exigences écologique et climatique.....	6
5.1. La température.....	7
5.2. La lumière.....	7

5.3. Eau et humidité.....	7
5.4. pH.....	7
5.5. Le sol.....	7
6. Production de la tomate.....	8
6.1. Dans le monde.....	8
6.2. En Afrique.....	8
6.3. En Algérie.....	9
7. Importance nutritionnelle de la tomate.....	11
8. Cultures de la tomate.....	11
9. Pathologie et ravageurs de la tomate.....	11
9.1. Pathologies non parasitaires.....	12
9.2. Pathologies parasitaires.....	12
9.3. Les ravageurs.....	12

## Chapitre II : L'agent causal

1. L'agent causal <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>lycopercisi</i> .....	14
1.1. Données générales sur <i>Fusarium oxysporum</i> .....	14
1.2. <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>lycopercisi</i> .....	15
1.2.1. Classification.....	15
1.2.2. Biologie et écologie.....	18
1.2.2.1. Caractères cultureux.....	18
1.2.2.2. Cycle biologique.....	19
1.2.3. Interaction Fol / tomate .....	20
1.2.4. Pathogénicité.....	20
1.2.4.1. Les enzymes.....	21
1.2.4.2. Les mycotoxines.....	21
1.2.5. Symptomatologie.....	23
1.2.6. Moyens de lutte.....	23
1.2.6.1. Lutte culturale.....	24
1.2.6.2. Lutte physique.....	24
1.2.6.3. Lutte chimique.....	24
1.2.6.4. Lutte génétique.....	25
1.2.6.5. Lutte	25

intégrée.....

1.2.6.6. Lutte biologique.....	25
--------------------------------	----

## Chapitre III : Biocontrôle de la fusariose vasculaire

1. Généralité sur le biocontrôle .....	26
2. Diversité des microorganismes antagonistes.....	27
2.1. Les rizhobactéries favorisant la croissance des plantes(PGPR).....	27

2.1.1. Effets bénéfiques.....	27
2.1.1.1. Stimulation de la croissance végétale.....	28
2.1.1.2. L'induction de la résistance systémique.....	29
2.1.1.3. La compétition trophique et spatiale.....	29
2.1.1.4. L'antibiose.....	30
2.1.1.5. Les composés organiques volatils.....	30
2.1.1.6. Les enzymes hydrolytique.....	31
2.2. Les champignons favorisant la croissance des plantes (PGPF).....	32
2.2.1. Mécanismes d'action.....	33
2.3. Les mycorhizes.....	35
2.3.1. Mécanismes d'action.....	35
2.4. Les cyanobactéries.....	37
2.4.1. Mécanismes d'action.....	37
2.5. Les bactéries lactiques.....	38
2.5.1. Mécanismes d'action.....	39
3. Stratégies de biocontrôle de la fusariose vasculaire.....	40
3.1. Combinaison de microorganismes.....	40
3.2. Sols résistants.....	41
3.3. Enrobage des graines.....	42
3.3.1. Rôle de l'enrobage des graines.....	44
3.3.1.1. Rôle de l'enrobage des graines contre fusariose vasculaire	44
3.3.1.2. Rôle de l'enrobage des semences dans l'augmentation de la productivité des cultures de tomate.....	44
3.4. Amélioration génétique des agents de biocontrôle .....	45
3.4.1. Amélioration de la production des composés antifongiques.....	45
3.4.2. Amélioration de la capacité de colonisation.....	46
3.5. Amélioration de la tolérance au stress abiotique des agents de biocontrôle.....	46
4. Commercialisation des agents de biocontrôle.....	47
4.1. Processus de commercialisation.....	48
4.2. Les critères de choix d'un agent de biocontrôle commercialisé.....	49
4.3. Facteurs qui limitent la commercialisation de la formulation des PGPM.....	49

4.3.1. Manque de preuves pratiques.....	49
4.3.2. La spécificité des PGPM.....	49
4.3.3. La préférence pour la formulation du PGPR.....	50
4.3.4. La survie et la stabilité des PGPR.....	50
4.3.5. Manipulation et re-inoculation du PGPM.....	50
<b>Conclusion</b> .....	52
<b>Références bibliographiques</b>	

## Introduction

La tomate est la culture la plus répandue dans le monde après celle de la pomme de terre, c'est le légume le plus consommé dans le monde (Blancard, 2009). Cette importance se manifeste surtout sur le plan alimentaire, car elle renferme selon les aspects, des quantités variables de protéines, de lipides, d'hydrates de carbone, de différents éléments minéraux et de vitamines divers, permettant ainsi la satisfaction qualitative des besoins nutritionnels (Si Mohammed, 2017). En Algérie, la culture de la tomate occupe une place importante dans la socio-économie et elle est considérée comme l'une des cultures prioritaires. En 2018, la superficie totale avoisinait les 22 323 hectares, avec une quantité estimée à 1 309 745 tonnes et 58, 6729 hg/ha (FAO, 2020).

Le développement de cette culture est limité à cause de plusieurs contraintes abiotiques à savoir, les conditions climatiques et la non maîtrise des techniques culturales. Et d'autres contraintes biotiques souvent attribuées aux ravageurs et à plusieurs maladies ayant pour cause divers agents pathogènes, nématodes, virus, bactéries, champignons et insectes, causant des pertes de rendement considérables engendrant des conséquences économiques non négligeables (Picot *et al.*, 2012).

Plus de 200 maladies affectent les plants de tomates dans le monde (Watterson, 1986), et constituent une menace pour la production, l'économie, l'environnement et la santé de l'homme. Parmi les maladies fongiques, on a, le mildiou (*Phytophthora infestans*), l'altérioriose (*Alternaria tomatophila*), l'oïdium (*Oïdium neolycopersici*), la fusariose vasculaire (*Fusarium oxysporum f.sp. lycopersici*) (Blancard, 2009), la moisissure grise (*Botrytis cinerea*) (Williamson *et al.*, 2007), et la septoriose (*Septoria lycopersici*) (Bovey, 1972).

La fusariose vasculaire de la tomate ou la flétrissure fusarienne due à *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici* (Fol), est favorisée par les changements climatiques dont l'augmentation de la température et l'humidité durant de longues périodes de l'année, ces facteurs accélèrent la croissance de l'agent causal de cette maladie. Cette dernière se déclare subitement et induit une pourriture au niveau du système racinaire : le cylindre central et le cortex des racines brunissent puis désagrègent provoquant ainsi un flétrissement brutal pouvant se propager dans toute la plante provoquant par la suite l'affaiblissement de la plante qui finit par mourir (Blancard, 2009). Cette maladie est

connue pour sa difficulté au diagnostic et sa propagation facile et rapide, constituant ainsi l'origine d'une importante perte pour les cultivateurs (Weller *et al.*, 2002).

Le seul moyen de lutte contre la fusariose était d'arroser les cultures avec du bénomyl ou encore du bromure de méthyle, mais ces produits se sont avérés dangereux et peu efficaces et ont été interdits par la suite. La prise de conscience du coût environnemental de ces pratiques et les craintes des consommateurs du danger que peuvent constituer les résidus de pesticides pour la santé humaine font naître un intérêt grandissant pour d'autres alternatives de lutte (Abdel-Kader *et al.*, 2012). Les producteurs ont eu recours à des variétés de tomates résistantes, essentiellement à la forme spéciale *lycopersici*, mais l'évolution génétique de ce champignon a donné naissance à de nouvelles races capables de contourner les résistances de ces variétés.

De ce fait, l'orientation des recherches vers l'adoption de stratégies de lutte biologique par l'utilisation de certains microorganismes non pathogènes, en tant que biopesticides et/ou biofertilisants, cette technologie émergente et écologiquement compatible, est considérée comme alternative prometteuse aux pesticides et engrais de synthèse (Mahanty *et al.*, 2017).

Diverses espèces bactériennes et fongiques ont le potentiel effet protecteur contre les phytopathogènes, tels que : *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma viridae* (Tucci *et al.*, 2011), *Pseudomonas spp* (Dmitri *et al.*, 2006), *Bacillus subtilis* (Shanmugam et Kanoujia, 2011), *Fusarium oxysporum* non pathogène (Alabouvette *et al.*, 2008 ; Kaur *et al.*, 2010), *Penicillium digitatum*, *Penicillium oxalicum* (Mujeeber et Shahana, 2002). Ces microorganismes peuvent agir directement et indirectement sur la plante à travers la production de composés antimicrobiens, d'enzymes lytiques, des toxines antifongiques, de la compétition pour la colonisation des sites infectieux et des éléments nutritifs, de l'induction de la résistance de l'hôte (Pal et Gardener 2006).

Notre travail a porté sur la synthèse de quelques travaux récents portant sur la diversité des microorganismes utilisés dans le biocontrôle de la fusariose vasculaire. Cette recherche a pour objectif aussi de synthétiser les mécanismes d'action de ces antagonistes ainsi que les différentes techniques et les méthodologie d'étude de la lutte biologique.

# 1. Historique

La tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) est originaire de l'Amérique du sud, dans une région s'étalant du sud de la Colombie jusqu'au nord du Chili et de la côte Pacifique en passant par les îles Galápagos (Shankara *et al.*, 2005). Elle a été d'abord cultivée et améliorée par les indiens du Mexique (Bénard, 2009) où neuf espèces ont été observées dont deux comestibles ; *Solanum pimpinellifolium* (tomate groseille) et *Solanum lycopersicum* var *cerasiforme* (tomate cerise) qui est l'ancêtre de notre tomate actuelle (Renaud, 2006). Ensuite elle a été introduite en Europe avant même la pomme de terre, le topinambour, le maïs et le tabac (Shankara *et al.*, 2005). C'est par les italiens qu'elle a été consommée pour la première fois au 16<sup>ème</sup> siècle (Schumann, 1996).

La tomate existait en espèces sauvages, avec des fruits verts, amers et non comestibles, elle a été considérée comme une plante vénéneuse, elle est donc restée une simple plante ornementale pendant trois siècles. C'était qu'au 17<sup>ème</sup> que l'espèce *Lycopersicon esculentum* var *cerasiforme* (tomate cerise) sort de son pays natal pour se retrouver dans les régions tropicales et subtropicales de l'Amérique, le Japon (Atherton, 2005) et atteint la France où elle s'est répandue à Paris lors de la révolution (Degioanni, 1997).

Le 19<sup>ème</sup> siècle, était marqué par une grande progression de la consommation de la tomate grâce aux chemins de fer qui ont conduit des fruits et légumes cultivés en France vers les autres régions dont les pays méditerranéens et le Maghreb où elle a connu une large utilisation culinaire. Puis les espagnols l'ont introduite en Algérie étant donné les conditions qui lui étaient propices. Sa consommation a commencé donc dans la région d'Oran en 1905 puis, elle s'étendit vers le centre du pays, notamment sur la baie algéroise (Latigui, 1984).

## 1. Description botanique

La tomate est une plante appartenant à la famille des solanacées et une espèce herbacée à cycle de culture court et annuel, avec un rendement élevé (Chaux et Foury, 1994). C'est une plante poilue avec des tiges plutôt grimpantes, cette plante potagère

herbacée pouvant aller de 40 cm jusqu'à plus de 5m de hauteur selon les variétés et le mode de culture (Dumortier *et al.*, 2010).

Le fruit de la tomate contient une quantité importante de petites graines (300 à 350 graines/gr). Leur longueur varie de 3 à 5 mm de long et 2 à 4 mm de large. Elles sont présentes en forme de rein ou de poire avec un aspect poilu et une couleur beige (Shankara *et al.*, 2005), les semences ont la capacité de garder leur faculté germinative pendant 4 à 5 ans, dans les conditions favorables (Rey, 1965).

La racine est une structure très développée qui constitue un système se trouvant à une profondeur de 30 à 40 cm (Kolev ,1976). La racine principale donne une grande densité de racines latérales et adventices (Shankara *et al.*, 2005).

La tige de la tomate est pleine, considérablement poilue et glandulaire, avec une longueur de 2 à 4 m (Shankara *et al.*, 2005).

Le fruit est connu pour sa couleur rouge, mais elle peut varier du jaune violacé au blanc, selon les variétés (Roumane ,1993). C'est une échancre charnue de forme globulaire ou aplatie avec 2 à 15 cm de diamètre. En général les fruits sont ronds et réguliers ou côtelés (Shankara *et al.*, 2005), ou peuvent être aussi sphériques, oblongues ou allongés selon les variétés (Renaud, 2003). Le fruit dissimule des graines appelées pépins entourés d'une sorte de gel qui provient de l'enveloppe de la graine (Polese, 2007).

Les fleurs sont bisexuées, régulières avec un diamètre de 1,5 et 2 cm. Elles poussent opposées aux feuilles ou entre elles. Le tube du calice est court et poilu avec des sépales persistants. Généralement, la fleur de la tomate est constituée de six pétales qui peuvent mesurer une longueur de 1 cm, qu'une fois mures, elles sont jaunes et courbées. L'androcée se forme de quatre étamines et les anthères sont d'une couleur jaune vif. L'ovaire est supère avec deux à neufs carpelles. En général la plante est autogame, mais la fécondation croisée peut avoir lieu grâce aux abeilles et aux bourdons (Shankara *et al.*, 2005).

Les feuilles sont simples, composées ou alternées, sans stipule, elles mesurent entre 15 à 50 cm de long et de 10 à 30 cm de large avec un pétiole présentant une longueur variant entre 3 et 6 cm. Les folioles sont poilues, ovées à oblongues (Shankara *et al.*, 2005)

### 3. Classification taxonomique

La tomate fait partie du genre *Lycopersicum* de la famille des Solanacées. Ce genre est formé de neuf espèces différentes dans la couleur de fruits, le nombre de feuilles entre les bouquets floraux, le mode de reproduction et la répartition géographique (Rick *et al.*, 1990). En 2000, Guignard a classé la tomate comme suit :

Règne	Plantae.
Embranchement	Spermaphytes
Sous embranchement	Angiospermes.
Classe	Dicotylédones
Sous classe	Gamopétales
Ordre	Polémoniales
Sous ordre	Solanales
Famille	Solanacées
Genre	<i>Lycopersicum</i>
Espèce	<i>Lycopersicum esculentum</i> Mill.

### 4. Les variétés

Il existe plusieurs variétés cultivées de tomates. Elles sont classées en se basant sur des critères botaniques, morphologiques, mode de croissance de la plante (la formation des feuilles, inflorescences et bourgeons), et selon le mode de fécondation (Shankara *et al.*, 2005).

#### 4.1. Selon le mode de fécondation

L'espèce *Lycopersicom esculentum* est diploïde avec  $2n = 24$  chromosomes, il en existe plusieurs mutants monogéniques dont certains sont cruciales pour la sélection. C'est une plante autogame mais on peut avoir une proportion de fécondation croisée par laquelle la plante peut se comporter comme plante allogame (Gallais et Bannerot, 1992). On distingue deux types de variétés dans ce contexte :

- Variété fixée : Il y a plus de cinq cents variétés de tomate, qui conservent les mêmes caractères parentaux. Leurs fruits sont plus ou moins réguliers, sensibles aux maladies mais offrent des fruits d'excellente qualité gustative (Polese, 2007). Les variétés les plus répandues en Algérie sont la Marmande et la Saint Pierre (SRPVM, 2017)
- Variétés hybrides : sont des variétés assez récentes, caractérisées par leur aspect hétérogène qui conduit à une apparition de gènes codants pour la résistance aux maladies, une nouaison meilleure durant les conditions défavorables (Chaux et Fourry, 1994).

#### **4.2. Selon le mode de croissance :**

Selon le mode de croissance il y a deux types de variétés :

- Variété à croissance indéterminée : Elle connaît une perpétuelle croissance en produisant des bouquets floraux quand les conditions sont favorables. Ce type de variété nécessite un taillage et un ébourgeonnement réguliers, il a également une production échelonnée, plus étalée et plus productive que les tomates à port déterminé. Cependant, cette croissance peut être suspendue par des facteurs extérieurs tels que le gel, ou régulée en taillant les plantes (Mikanowski et Mikanowski, 1999).
- Variété à croissance déterminée : Leur croissance s'arrête une fois que la plante produit trois à quatre bouquets floraux seulement, ce sont donc des variétés naines. Il en existe aussi des variétés fixées et des hybrides (Besford et Maw, 1975). Cette variété est destinée à l'utilisation dans le domaine agro-alimentaire (variété industrielle) (Laumonier, 1979).

### **5. Les exigences écologiques et climatiques**

Le *Lycopersicum esculentum* Mill a des exigences particulières envers les conditions de l'environnement (sensibilité au froid et au gel, les vents chauds et la température élevée (Polese, 2007).

### **5.1. La température**

Le climat favorable pour le développement de la tomate est un climat relativement sec et frais, avec une température optimale variant de 21° C à 24 °C. Par ailleurs elle peut supporter un certain intervalle de température mais pas en dessous de 10°C et audessus de 38°C, les tissus végétaux dans ce cas seront endommagés. Un équilibre entre la température diurne et nocturne est nécessaire pour obtenir une bonne croissance et une bonne nouaison (Shankara *et al.*, 2005).

### **5.2. La lumière**

La tomate étant une plante exigeante en énergie lumineuse, il est donc important de maintenir une longueur appropriée d'obscurité afin de contrôler sa croissance et son développement. En outre, un faible rayonnement lumineux réduit le nombre de fleur par bouquet et affecte ainsi la fécondation. De plus, l'intensité de la lumière affecte la couleur des feuilles, la mise et la couleur des fruits (Cirad, 2002).

### **5.3. Eau et humidité**

La plante est très sensible à l'hygrométrie, elle ne tolère pas les sols engorgés ni un taux d'humidité élevé (plus de 80%) et une hygrométrie relativement ambiante de 60% à 65% soit la meilleure pour la fécondation. 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 les longues périodes arides fait tomber les bourgeons et les fleurs et provoque le fendillement des fruits (Munro et small, 1998).

### **5.4. pH**

La tomate tolère modérément un large intervalle de valeurs du pH, mais, pousse le mieux dans des sols ou le pH varie entre 5.5 et 6.8 (Shankara *et al.*, 2005).

## **5.5. Sol**

La tomate pousse bien sur la plupart des sols qui ont une bonne capacité de rétention de l'eau et une bonne aération. Elle préfère les terres limoneuses profondes et bien drainées (Shankara *et al.*, 2005).

## **6. Production de la tomate**

### **6.1. Dans le monde :**

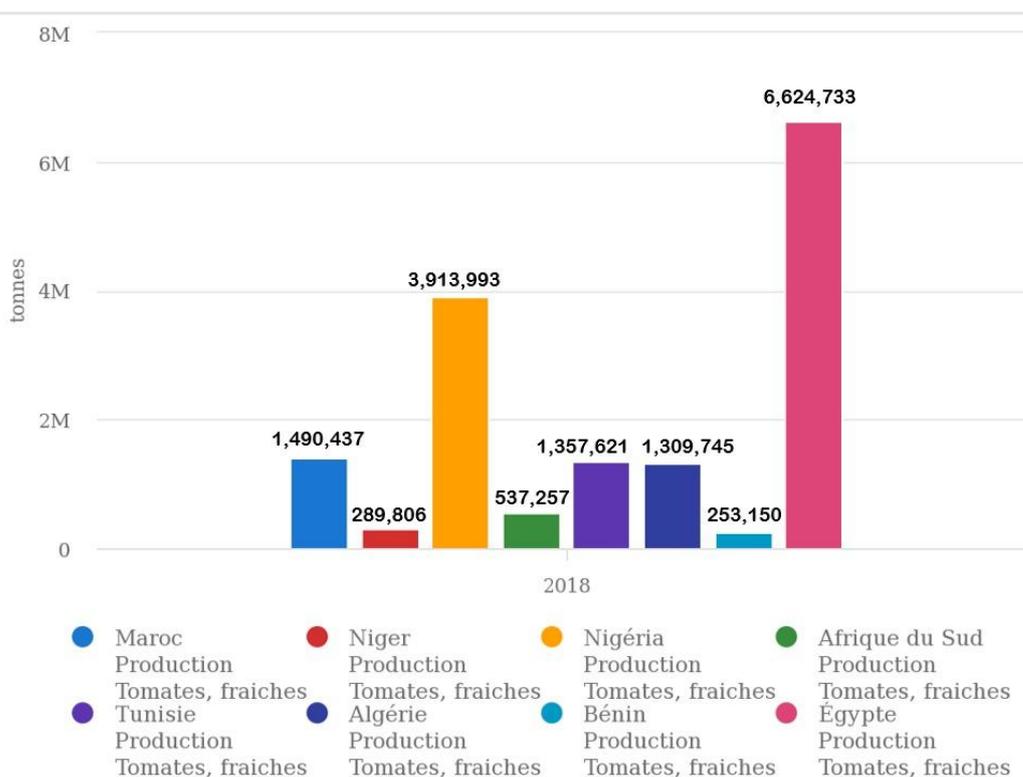
La tomate est le deuxième légume le plus répandu mondialement après la pomme de terre. La culture de la tomate est un produit très important dans le secteur économique vu son revenu et son importance nutritionnelle, on peut la trouver dans les champs extérieurs, les maisons en filets et sous serres. (Arbaoui, 1984).

D'après les statistiques fournies par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la production mondiale de tomates était à plus de 182 millions de tonnes sur une superficie arrivant à plus de 4 millions d'hectares en 2017, avec un rendement allant jusqu'à plus de 37 tonnes par hectare. En 2018, ce nombre est augmenté à 188 tonnes enregistrant ainsi une hausse de 3.5 % par rapport à l'année précédente (FAO,2020). Dans le monde, la Chine est le plus grand producteur de tomates avec une quantité mesurée de plus de 56 millions de tonnes par an. L'Inde est en deuxième position avec une production annuelle de plus de 18 millions de tonnes (FAO, 2020)

La production de tomate au monde comprend deux filières différentes ; celle qu'on consomme en frais (tomate marché) et la tomate d'industrie qui est destinée à la confection des conserves et la transformation. Les tomates fraîches : elles existent tout au long de l'année, elles sont cultivées désormais dans de nouvelles zones d'où elles étaient exclues auparavant afin d'améliorer le rendement et l'aspect de la culture, cela est grâce à la sélection génétique et aux nouvelles techniques utilisées (Polese, 2007). Les tomates d'industrie : tomates destinée pour la transformation et la fabrication des conserves (Chaux et Foury, 1994), elle représente la moitié de la production mondiale (Heuvelink, 2009).

## 6.2. En Afrique :

L'Égypte, le Nigeria, le Maroc, la Tunisie et l'Algérie sont les plus grands producteurs de tomates dans le continent africain, ils fournissent 80% de la production totale de la tomate. Chacun de ces pays a enregistré des taux élevés de la croissance de la production durant l'année 2018 (FAO, 2020) (figure 1).

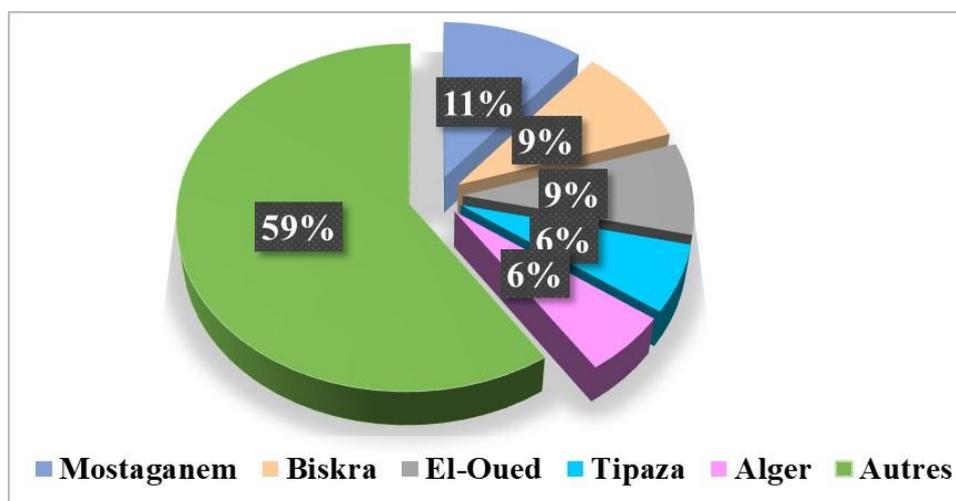


**Figure 01** : Les principaux producteurs de la tomate en Afrique (FAO, 2020).

## 6.3. En Algérie :

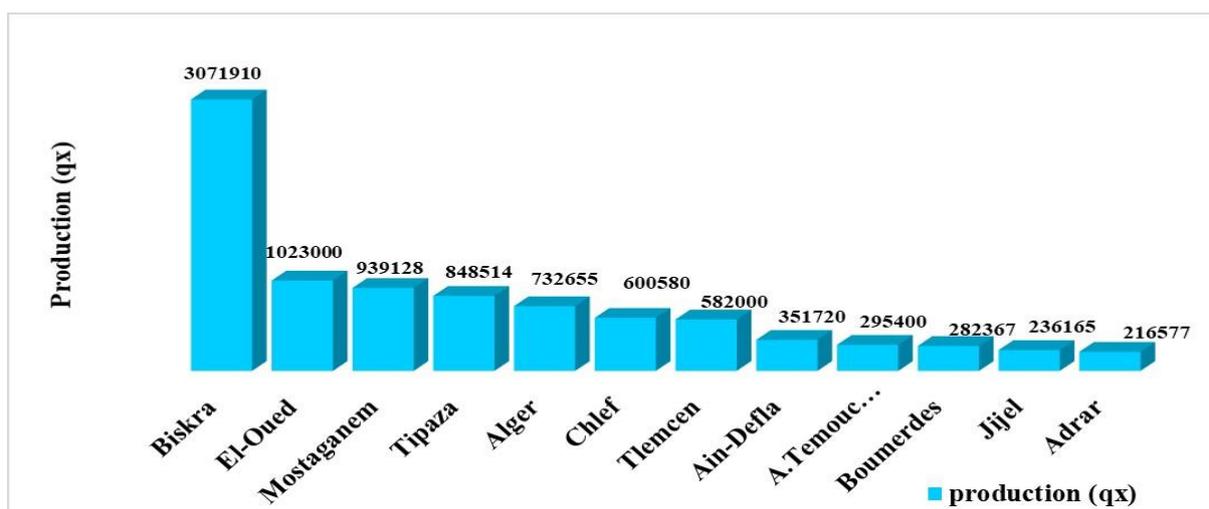
La culture de la tomate en Algérie est classée en deuxième position après celle de la pomme de terre, elle a connu ses débuts à partir des années 1900, dans la région de l'est avec la création de la première conserverie TOMACOOOP à Annaba. En 1970, le nombre d'usines est passé à 26 sur le niveau national. Les surfaces consacrées à la tomate industrielle ont également augmenté, pour passer de 100 hectares en 1930 à 2 000 en 1960, pour arriver à une fourchette comprise entre 16 000 et 20 000 hectares ces dernières années (Si Mohamed, 2017). En effet, durant l'année 2018, la superficie dédiée à la culture de la tomate était estimée à plus de 22 mille hectares avec un rendement mesurant 587 mille hg/ha approximativement, soit quantité dépassant 1 million tonnes dans le pays (FAO, 2020)

Tipaza et Alger occupent 12% de la superficie récoltée nationale, suivies de Mostaganem qui occupe 11%, Biskra et El-Oued 9%, uivies des autres wilayas qui occupent 59% en 2016 (MADRP, 2019) (figure 02).



**Figure 02** : Répartition de la superficie nationale de tomate en 2016 (MADRP, 2019)

La wilaya de Biskra vient en tête des 12 wilayas productives de tomate avec une production plus de 3 million de quintaux, El-Oued est la secondaire région productrice avec une production plus de 1 million de quintaux et la troisième région est Mostaganem avec une production de 939128 de quintaux. Suivie de Tipaza avec une production de 848514 de quintaux (figure 03).



**Figure 03** : La production de tomate par wilaya en 2016 (MADRP, 2019)

Selon le MADRP, en 2016. La wilaya de Biskra a le rendement le plus élevé avec 1403 qx/ha, Suivi de Tindouf avec 900qx/ha et Ain-Defla avec un rendement de 742,8qx/ha, puis Chlef avec un rendement de 669,15 qx/ha.

Plusieurs variétés sont cultivées en Algérie, où on trouve la culture de multi chapelles et tunnel telles que : Panekra, Valouro, Kawa, Tofen, Tyerno, Timgad, Keylago, Agora et Zahra, la culture en plein champ comme : Zéralda et Halida et la tomate en grappe : Miracle Grappe (ITCMI, 2018).

## **7. Importance nutritionnelle de la tomate :**

La tomate est un légume-fruit indispensable dans notre alimentation quotidienne (cru, cuit, transformé en jus de fruits, sauces, ketchup et conserves) vu ses valeurs nutritionnelles et sa réputation pour la prévention contre les maladies telles que le cancer et les maladies cardiovasculaires (Sharoni et Levi, 2006). Cet effet protecteur est dû à sa contenance en composants bioactifs et antioxydants (Borguini et Torres, 2009) comme les carotènes (lycopène qui donne leur couleur rouge aux tomates ainsi que  $\beta$ -carotène), l'acide ascorbique, tocophérol et les composés phénoliques (Periago *et al.*, 2009).

Le lycopène le plus puissant antioxydant des caroténoïdes a présenté d'autres effets bénéfiques sur la santé tels que l'induction de la communication entre les cellules, la modélisation des hormones du système immunitaire et d'autres voies métaboliques. Il neutralise, plus efficacement, le radical libre, particulièrement agressif, dérivé de l'oxygène. Ses composés phénoliques présentent un large éventail de propriétés physiologiques comme des anti-allergéniques, anti-inflammatoires, anti- microbien, antithrombotique, anti- athérogène et effets cardioprotecteurs et vasodilateurs (Balasundram *et al.*, 2006).

## **8. Cultures de la tomate**

La tomate est cultivée selon deux systèmes principaux : soit en plein champ, qui est le système de culture le plus utilisé. Si l'irrigation est disponible, les plantations peuvent être faites en saison sèche. La mécanisation est souvent réduite à la préparation du sol (Cirad, 2002). Ou bien en culture sous abris, qui est un système de culture visant à produire les tomates au long de l'année. Il permet de développer des productions hydroponiques, supprimant ainsi certaines contraintes liées au sol (Cirad et Gret, 2002).

## 9. Pathologies et ravageurs de la tomate

Plusieurs maladies menacent les cultures de la tomate dans le monde, des centaines sont dues à des bioagresseurs et plus de 50 sont non parasitaires. Ces maladies représentent un véritable facteur qui affecte la production, l'économie, l'environnement et la santé de l'homme (Blancard, 2009).

### 9.1. Pathologies non parasitaires

Ces pathologies sont généralement provoquées par des carences au niveau des éléments nutritifs et les conditions climatiques défavorables. Parmi les plus répandues, on cite : la pourriture apicale qui se manifeste suite à une carence en calcium ; le fendillement des fruits qui est causé par des fluctuations dans la teneur en humidité du sol ou de la température ; l'asphyxie racinaire, provoquée par des irrigations très abondantes ou des pluies excessives ; la tige boursouflée, causé par une alimentation azotée excessive ; l'altération des fruits, dus aux coups de soleil ou à des fentes de croissance (Shankara *et al.*, 2005).

### 9.2. Pathologie parasitaire

La tomate est sensible à différentes maladies, à savoir, des maladies fongiques comme, la septoriose (*Septoria lycopersici*) (Bovey, 1972), le mildiou (*Phytophthora infestans*) (Blancard, 2009), la moisissure grise (*Botrytis cinerea*) (Williamson *et al.*, 2007) et la fusariose vasculaire (*Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*), des maladies bactériennes telles que, la tache bactérienne (*Xanthomonas vesicatoria*) (Blancard, 2009) et la moucheture bactérienne (*Pseudomonas syringae* pv. *Tomato*) (Blancard, 2009., Wilkie et Dye, 1974), ainsi que diverses maladies virales, citons, le TSWV (Tomato Spotted Wilt Virus) qui est transmis par différentes espèces de thrips (Messiaen et Lafon, 1970).

### 9.3. Les ravageurs :

Parmi les ravageurs attaquant aux plants de tomates, on a ; les nématodes qui infectent les racines et constituent un problème important pour les cultures en provoquant des galles (des tumeurs cancéreuses). Parmi ces ravageurs, on peut citer : *Meloïdogyne icognita*, *Meloïdogyne arenaria* et *Meloïdogyne javanica*. Les plantes atteintes restent

petites de taille et sont sensible aux maladies fongiques et bactériennes transmises par le sol. Les insectes à leur tour provoquent des dommages mécaniques en piquant et suçant, parmi eux ; les thrips, les pucerons, et les mouches blanches, Leur danger réside dans la transmission de différents virus, provoquant ainsi des dommages très importants (Shankara, 2005).

# 1. L'agent causal *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*

## 1.1. Données générales sur *Fusarium oxysporum*

Le genre *Fusarium*, décrit pour la première fois par Linke en 1809, appartient à la famille des Tuberculariacées, dans le groupe des Hyphomycètes (champignons filamenteux). L'absence de reproduction sexuée permet de rattacher ces champignons aux Deutéromycètes (champignons imparfaits), regroupement artificiel de formes asexuées (ou anamorphes) variées, certaines espèces de *Fusarium* ont une forme sexuée, dite également forme parfaite ou téléomorphe, appartenant aux genres *Necteria* ou *Gibberella* (Gams et Nirenberg, 1989) dans l'ordre des Hypocréales, ou des Ascomycètes.

Les membres des espèces de *Fusarium* sont des agents pathogènes omniprésents du sol, leur présence est cosmopolite, ils ont été isolés dans le pôle nord et dans le sable des déserts. On les trouve également sur les terres cultivées et dans les régions chaudes tropicales. Ils sont associés à différentes maladies de plantes (flétrissements vasculaires, des pourritures et des maladies de la fonte des semis) (Bodah, 2017), à des cancers et à des problèmes de croissance chez les humains et chez les animaux domestiques (Shukla *et al.*, 2003).

Dans le genre *Fusarium*, l'espèce *Fusarium oxysporum* est la plus répandue dans le monde. Elle peut être retrouvée dans la plupart des sols : arctiques (Kommedahl, *et al.*, 1988), tropicales, désertiques (Mandeel *et al.*, 1995), cultivés ou non (Mc Mullen et Stack, 1984). Elle peut également être dispersée par les insectes (Gillespie et Menzies, 1993) et récupérée à partir d'algues marines (Granchinho *et al.*, 2002).

Ce champignon survit dans le sol en forme de chlamydospores dormantes et immobiles jusqu'à la stimulation de la germination par des substrats organiques ou par des exsudats racinaires (Agrios, 2005). Ces exsudats représentent une source de carbone pour le champignon (Jones *et al.*, 2004). Suite à la germination, il y a formation d'un mycélium et si les conditions sont favorables, le thalle produit des conidies. (Agrios, 2005).

Les espèces de *Fusarium oxysporum* se caractérisent par une large gamme de plantes hôtes et la plupart des souches pathogènes de *F.oxysporum* envahissent le système vasculaire de ces plantes et présentent une spécificité parasitaire, c'est-à-dire que l'espèce ne peut attaquer qu'un hôte déterminé (Ozenda, 1990). Elle comprend plus de 120 formes spéciales correspondant aux hôtes qu'elles infectent. Plusieurs tentatives ont été faites afin d'identifier les formes spéciales sur la base de critères biochimiques, sérologiques ou

morphologiques, mais seuls les tests d'inoculations des plantes restent les plus fiables et rendent cette identification possible (Messiaen et Cassini, 1981).

En raison de la complexité des caractères phénotypiques et des similitudes génotypiques remarqués chez les formes spéciales de Fo, la compatibilité végétative entre les isolats a été analysé et regroupée en de nombreux groupes de VCG. Puhalla (1985) a classé 16 VCG. Depuis lors, de nombreux chercheurs ont classé les isolats de *F. oxysporum* de cette manière et ont adopté ce système numérique pour la classification. Dans ce système, les isolats compatibles végétativement reçoivent un code VCG composé d'un nombre à quatre (ou cinq) chiffres avec les trois premiers chiffres correspondant à la spécialisation de l'hôte, ou forme spéciale, et le (s) dernier (s) chiffre (s) correspondant aux VCG individuels dans la forme spéciale (tableau 01).

## **1.2. *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici***

### **1.2.1. Classification**

C'est un champignon pathogène responsable de la fusariose vasculaire, il a été isolé à partir de la tomate, il n'affecte que cette plante, donc il constitue ce qu'on appelle « forme spéciale *lycopersici* ». Agrios (1998) a établi la classification suivante :

Domaine :	Eukaryota
Règne :	Mycota
Division :	Deuteromycota
Classe :	Hyphomycota
Ordre :	Hyphale
Famille :	Tuberculariaceae
Genre:	<i>Fusarium</i>
Espèce:	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>lycopersici</i>

**Tableau 01** : Groupes de compatibilité végétative (VCG) de *Fusarium oxysporum* répertoriés par formes spéciales

Formes spéciales	Hôte	Code de la forme spéciale	Numéro attribue pour VCG	Nombre de VCG	Référence
<i>albedinis</i>	Palmier dattier ( <i>Phoenix dactylifera</i> )	017-	0170	1	Tantaoui et al, (1996)
<i>apii</i>	Céleri ( <i>Apium</i> )	001-	0010 à 0012	3	Correll et al, (1987)
<i>asparagi</i>	Asperge ( <i>asparagus</i> )	100-	1001 à 1008	8+a	Elmer et Stephens (1989)
<i>basilici</i>	Basilique ( <i>ocimum</i> )	016-	0160	1	Katan et katan (1996)
<i>betae</i>	Beta	...	...	7+	Harveson et Rush (1997)
<i>chrysanthemi</i>	Chrysanthèmes ( <i>Chrysanthemum</i> )	005-	0050 à 0051	2	Puhalla (1985)
<i>ciceris</i>	Pois chiche ( <i>Cicer</i> )	...	...	1	Nogales-Moncada et al, (1993)
<i>conglutinans</i>	Chou ( <i>Brassica</i> )	010-	0101	1	Kistler et al, (1995)
<i>cubense</i>	Banane ( <i>Musa</i> )	012-	0120 à 0126, 0128 à 01220	21 ? c	Ploetz (1994)
<i>cucumerinum</i>	concombre ( <i>Cucumis sativus</i> )	018-	0180	1+	Katan (1996)
<i>cyclaminis</i>	Cyclamen	015-	0151 à 0153	3	Woudt et al, (1995)
<i>dianthi</i>	L'œillets ( <i>Dianthus</i> )	002-	0020 à 0022, 0025, 0027, 0028	6	Baayen et al, (1997)
<i>elaeidis</i>	Palmier à huile ( <i>Elaeis</i> )	001-*d, 014-	0011 à 0015, 0140 à 0141	5	Dossa et al, (1991), Flood et al, (1992)
<i>erythroxyli</i>	Coca ( <i>Erythroxyllum</i> )	...	...	1	Sands et al, (1997)
<i>gladioli</i>	Glaïeul ( <i>Gladiolus</i> )	034-	0340 à 0343	4	Mes et al, (1994)
<i>lactucum</i>	Laitue ( <i>Lactuca</i> )	...	...	1	Hubbard et Gerik (1993)
<i>lilii</i>	Lys ( <i>Lilium</i> )	...	...	4	Loffler et Rumine (1991)
<i>lupini</i>	Lupin ( <i>Lupinus</i> )	...	...	2?+	Rataj-Guranowska (1992)
<i>lycopersici</i>	Tomate ( <i>Lycopersicon</i> )	003-	0030 à 0033	4+	Marlatt et al, (1996)
<i>mathioli</i>	Giroflée ( <i>Mathiola</i> )	010-	0103	1	Kistler et al, (1995)
<i>medicaginis</i>	Luzerne cultivée ( <i>Medicago</i> )	004-	0040 à 0041	2	Puhalla (1985)
<i>melongenae</i>	Aubergine ( <i>Solanum melongena</i> )	017-	0170	1	Katan (1996)

<i>melonis</i>	Melon ( <i>Cucumis melo</i> )	013-	0130 à 0138	8+	Jacobson, et Gordon (1990), Katan et al, (1994)
<i>niveum</i>	Pastèque ( <i>Citrullus</i> )	008-	0080 à 0082	3	Larkin et al, (1990)
<i>phaseoli</i>	Haricot ( <i>Phaseolus</i> )	016-	0161 à 0165	5	Woo et al, (1996)
<i>pisi</i>	Pois cultivé ( <i>Pisum</i> )	007-	0070	6?+	Bodker et al, (1994),
<i>radicislycopersici</i>	Tomate ( <i>Lycopersicon</i> )	009-	0090 à 0098	8+	Katan et al, (1991), Rosewish et al, (1997)
<i>raphani</i>	Radis ( <i>Raphanus</i> )	010-	0102	1	Kistler et al, (1995)
<i>spinaciae</i>	Épinards ( <i>Spinacia</i> )	...	...	3	Fiely et al, (1995)
<i>tracheiphilum</i>	Haricot ( <i>Vigna</i> )	006-	0060	1	Puhalla (1985)
<i>tuberosi</i>	Pomme de terre ( <i>Solanum tuberosum</i> )	...	...	6	Venter et al, (1992)
<i>vasinfectum</i>	Cotonnier ( <i>Gossypium</i> )	0011-	0111 à 01110	10	Fernandez et al, (1994)

a + = Les isolats supplémentaires sont incompatibles avec les VCG établis. b... = code VCG et numéros non attribués. c? = Deux ou plusieurs de ces VCG peuvent se chevaucher. d \* = code forme speciale précédemment donné à forme speciale *apii* par Puhalla (1985).

Il existe trois différentes races de *F. oxysporum* f.sp. *lycopersici*. Elles se distinguent entre elles par leur degré de virulence vis-à-vis des différents cultivars de tomate.

- **La race 1** : a été initialement décrite en 1886 (Booth, 1971), la découverte d'un gène de résistance par Bohn et Tucker en 1939 (Beckman *et al.*, 1988) et son introduction dans de nombreuses variétés de tomates a permis de limiter l'incidence de cette première race dite 1.

- **La race 2** : est apparue pour la première fois en 1945 à l'Ohio aux U.S.A (Alexander et Tucker, 1945 ; Randall, 1980), puis au Maroc (Pecault et Laterrot, 1966), en Tunisie (Davet, 1967), au Moyen orient (Walker, 1971), aux Pays Bas (Hubbeling et Dimond, 1972), en Grande Bretagne (Gabe et Kright, 1973), en République de sud-africain (Holtz, 1976) et aussi en Italie en 1999 (Stravato, 1999).

- **La race 3** a été observée en Australie en 1978 (Grattidge, 1982) et a été successivement rapportée aux Etats unis : en Californie (Davis *et al.*, 1988), Floride (Volin et Jones, 1982), Géorgie (Chellemi *et al.*, 1992), Arkansas et Nord Carolina (Marlatt *et al.*, 1996) et au Tennessee (Bost, 2001). Elle a également été retrouvée au Mexique (Valenzuela-Ureta *et al.*, 1996) et au Brésil (Reis, 2005).

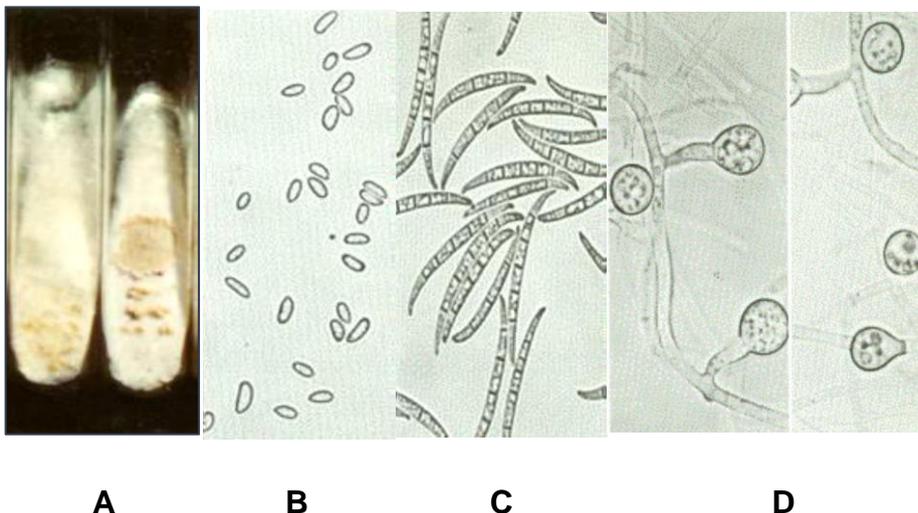
Les trois races de ce champignon sont classées dans quatre groupes de compatibilité végétative, les deux premières races sont actuellement regroupées dans 3 groupes de compatibilité végétative, le VCGs 0030 à 0032, la troisième race appartient au VCGs 0030 et 0033 (Cai *et al.*, 2003).

Classiquement, l'identification des isolats pathogènes des formes spéciales de *F. oxysporum* est basée sur des tests de pathogénicité (Recorbet *et al.*, 2003). Par conséquent, on tente de plus en plus de remplacer ces méthodes par des techniques d'identification moléculaire (Lievens *et al.*, 2008). Malheureusement, la discrimination moléculaire des isolats de *F. oxysporum* est compliquée par la nature polyphylétique de nombreuses formes spéciales (Kistler *et al.*, 1997). Idéalement, l'identification moléculaire des souches de *F. oxysporum* est basée sur des séquences d'ADN directement liées à la pathogénicité (spécifique à l'hôte) ou à la non pathogénicité (Recorbet *et al.*, 2003 ; Lievens *et al.*, 2008).

## 1.2.2 Biologie et écologie

### 1.2.2.1 Caractères cultureux

Les mycéliums (A) de *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici*. Snyder et Hans (2003) sont délicatement blancs à roses, souvent avec une teinte pourpre, et sont clairsemés à abondants. Le champignon produit trois types de spores : les microconidies (B), les macroconidies (C) et les chlamydospores (D) (figure 04)



**Figure 04** : Identification de *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici* (Toussoun et Nelson ,1976). Microconidies (B), les macroconidies (C) et les chlamydospores (D)

Au niveau macroscopique, l'aspect cultural de *F. oxysporum* f.sp. *lycopersici* sur milieu Potato Dextrose Agar (PDA) correspond à un mycélium aérien de croissance rapide, et de couleur variable allant du blanc au rose ou violet (figure 05). Cependant, l'aspect des souches de *F. oxysporum* peut fréquemment varier d'une culture à l'autre après des repiquages successifs, voire dans une même culture où des sections de couleurs ou d'aspects différents peuvent apparaître (cotonneux, duveteux, ras muqueux) (Burnett, 1984 ; Windels, 1992).



**Figure 05** : Colonies de *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici* sur milieux PDA (Nikhat et al., 2019).

*Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* se caractérise par trois types de structures biologiques, les macroconidies, les microconidies et les chlamydospores.

- Les microconidies sont abondantes et généralement monocellulaires, ovales ou réniformes, produites en fausses têtes sur des conidiophores monophialides courts.
- Les macroconidies fusiformes, sont également abondantes, comportent quatre à six cellules dont une cellule apicale plus mince que les autres et une cellule basale en forme pied.
- Les chlamydospores sont présentes, solitaires ou en paires, lisses ou rugueuses, globuleuses terminales ou intercalaire de 5 à 15  $\mu\text{m}$  de diamètre (Komi, 1993), ce sont des organes de conservation, résultant de l'accumulation de réserves dans une région conidie qui se dilate quelque peu et s'entoure finalement d'une membrane épaisse de teinte généralement foncée.

### 1.2.2.2. Cycle biologique

*Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* présente une phase saprophyte et une autre parasitaire au cours de son cycle biologique. Cela dépend de la présence ou l'absence de sa plante hôte (tomate) (Nelson *et al.*, 1981 ; Beckman, 1988).

La phase saprophytique se caractérise par la conservation du champignon au niveau du sol et sous les trois formes de spores (macroconidies, microconidies et chlamydospores), il survit grâce aux matières organiques qui proviennent des débris végétaux (Beckman, 1988). En présence de la plante hôte et des conditions favorables, le champignon germe pour atteindre les sites privilégiés sur les racines et initier le processus de l'infection, c'est ce qu'on appelle la phase parasitaire (Van Loon, 2007).

Par la suite, le champignon a tendance à coloniser rapidement l'hôte exclusivement à l'intérieur des vaisseaux du xylème. Dans les vaisseaux, le champignon commence à produire des microconidies, qui sont transportées vers le haut à travers le flux de la sève lors du détachement. De plus, la germination des microconidies entraîne une pénétration mycélienne des vaisseaux supérieurs (McGovern, 2015), Au cours de cette phase, le champignon qui reste limité aux vaisseaux du xylème, se propage à travers le tissu parenchymateux et commence à sporuler abondamment à la surface de la plante, comme la feuille, la vapeur, etc. La dissémination du pathogène peut se produire via les graines, les greffes, le sol ou d'autres moyens (Joshi, 2018).

### 1.2.3. Interaction Fol/tomate

Pour initier la germination des spores, il est connu que les exsudats de la racine des plants de tomates stimulent la germination des microconidies Fol. De plus, une relation a été trouvée entre la stimulation de la germination et l'âge des plantes. La stimulation la plus élevée de la germination a été observée lorsque les plantes étaient âgées de 70 à 90 jours. (Scheknecht *et al.*, 2006). Des études récentes rapportent que les processus physiologiques et développementaux de Fol sont régulés par trois voies de signalisation identifiées comme MAPK (Mitogen-Activated Protein Kinases) : (Fmk1), (Mpk1) et (Hog1). L'activation de ces voies de signalisation se traduira par l'expression de gènes et de transcriptions nécessaires pour réguler le processus d'infection et le développement de la maladie, tels que l'expression de la pathogénicité, la croissance infectieuse ou l'attachement des racines, une fois que Fol identifie l'hôte (Zhao et Mehrabi., 2007 ; Hamel *et al.*, 2012).

#### 1.2.4. Pathogénicité

La pathogénicité de *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* réside essentiellement dans sa sécrétion de multiples enzymes extracellulaires et de divers mycotoxines qui lui permettent de pénétrer et d'infecter les tissus de l'hôte. Ainsi que l'implication de gènes spécifiques, tel que le gène Rh01 lié aux caractéristiques de la paroi cellulaire de Fol, qui joue un rôle crucial dans l'infection, évitant la reconnaissance par le système de défense de l'hôte (Martínez-Rocha *et al.*, 2007). Le gène Fow1 joue également un rôle dans la pathogénicité de Fol vu qu'il code pour une protéine qui est spécifiquement nécessaire pour la colonisation dans les tissus végétaux puisque son absence entraîne une réduction de la virulence de Fol (Inoue, 2002). De même, l'implication du gène Fpd1 a été décrite, qui a pour fonction possible de coder une protéine transmembranaire dont la carence réduit la pathogénicité de Fol (Kawabe, 2004).

##### 1.2.4.1. Les enzymes :

L'initiation de l'infection par Fol nécessite la dégradation de la paroi cellulaire de l'hôte par l'action d'un complexe d'enzymes à activité lytique comme les xylanases, les cellulases, les pectinases et les polygalacturonases.

Des études ont été menées afin de déterminer le rôle de la dégradation du xylane dans la virulence de *F. oxysporum* f.sp. *lycopersici*. Il a été constaté que quatre gènes d'endoxylanase différents (xyl2, xyl3, xyl4 et xyl5) étaient exprimés à différents stades de l'infection (Calero-Nieto *et al.*, 2007).

Une augmentation de la pectine méthyle estérase (PME) est trouvée dans les plantes malades. Cela les rend plus vulnérables aux attaques de l'enzyme de division de la pectine, la dépolymérase pectique. Ainsi, selon Deese et Stahman (1962), la dépolymérase pectique couplée à la PME sont des facteurs biochimiques importants impliqués dans la production des symptômes de la fusariose chez les tomates.

Selon Baayen *et al.* (1997), le développement de symptômes de flétrissement chez les plants inoculés s'est accompagné d'une augmentation quadratique de l'activité de la polygalacturonase.

Husain et Dimond (1960) ont rapporté que l'action de la cellulase produite par *F. oxysporum* f.sp. *lycopersici* peut agir dans la pathogenèse de trois manières. Premièrement, elle est impliquée dans l'induction du flétrissement. Deuxièmement, les produits hydrolytiques

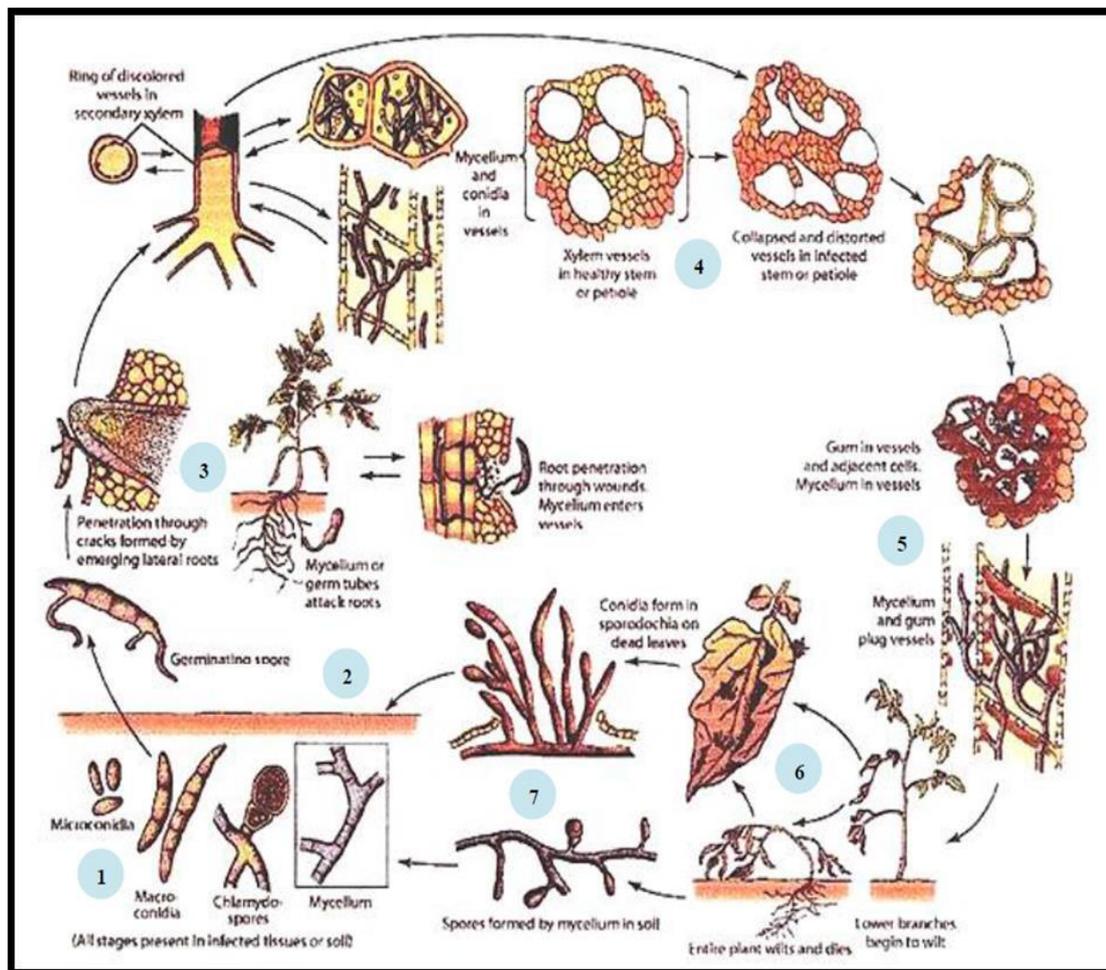
de l'activité cellulase peuvent fournir à *Fusarium* des hydrates de carbone pour son développement continu chez l'hôte, et troisièmement, elle est impliquée dans la fuite du pathogène du tissu vasculaire à des stades avancés de la maladie.

#### **1.2.4.2. Les mycotoxines**

Les mycotoxines produites par Fol jouent un rôle majeur dans le développement et la progression des symptômes du flétrissement, parmi ces mycotoxines on a, la fumosine et l'acide fusarique.

Singh *et al.* (2017) ont caractérisé les effets phytotoxiques de l'acide fusarique dans les feuilles de tomate qui ont révélé une réduction de la photosynthèse, du flétrissement et de la nécrose des feuilles, une énorme peroxydation lipidique et des espèces réactives intracellulaires d'oxygène et la mort cellulaire.

La fumosine perturbe la biosynthèse des sphingolipides membranaires chez les espèces végétales, ce qui est probablement dû à l'accumulation d'intermédiaires sphingolipides toxiques qui inhibent l'enzyme céramide synthase et, par conséquent, perturbent la signalisation et les fonctions cellulaires (Merrill *et al.*, 2001 ; Abbas *et al.*, 1993).



**Figure 06** : Cycle de vie de *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* (Agris, 2005)

1-Conidies, chlamydospores ou mycélium vivant dans le sol ; 2-Germination des spores ; 3-Pénétration du tube germinatif à l'intérieur des racines ; 4-Invasion des vaisseaux par les conidies et/ou mycélium ; 5-Production de gomme à l'intérieur des vaisseaux ; 6-Flétrissement et mort de la plante ; 7-Sporodochies ou mycélium produisant des conidies.

### 1.2.5. Symptomatologie :

Les symptômes de flétrissement se caractérisent par un jaunissement qui apparaît au début sur toute la plante (figure 07-a) avec apparition des nécroses qui se généralisent par la suite, les symptômes affectent l'ensemble du feuillage et la plante meurt (Bouhot, 1972). Ceux-ci apparaissent en raison du blocage des vaisseaux déclenchés par la collecte d'hypes fongiques, la libération de toxines, de gommages, de gels et la formation de tyloses, ce qui conduit à l'obstruction partielle ou totale des tissus vasculaires. Une coupe longitudinale au niveau de la tige des plantes atteintes, présente dans la partie ligneuse et adjacente au cortex vert, une coloration brune sombre des tissus conducteurs (Smahi, 2008). Des coupes

transversales laissent apparaître également des tissus contenant des vaisseaux nécrosés et des fragments mycéliens, une coloration brune foncé (Smahi, 2008 ; Blancard, 2009) (figure 07-b).



**Figure 07 :** Symptômes du flétrissement causé par le *Fusarium oxysporum*. f. sp.

*Lycopersici* (Karthika *et al.*, 2020). (A) Vue de champ de plants de tomates infectés ; noter le jaunissement des feuilles les plus anciennes. (B) Décoloration des tissus vasculaires des plants de tomates infectés par le Fusarium

### 1.2.6. Moyens de lutte :

D'une manière générale, les moyens de lutte utilisés contre la fusariose vasculaire ne peuvent que ralentir la progression de la maladie, ils ne permettent pas de mieux combattre l'agent pathogène, donc ils sont d'ordre préventif seulement (Besri, 1979)

#### 1.2.6.1. Lutte culturale :

D'après Abadie *et al.*, (1998), la lutte culturale se pratique par l'utilisation des cultivars résistants, en pratiquant la jachère, réaliser des rotations de 5 à 7ans en assurant que le précédent cultural est une légumineuse, tout en évitant l'utilisation des grains et des plants infestés.

Diminuer la croissance et la virulence du pathogène en élevant le PH du sol par l'ajout d'amendement de chaux (Scott, 1923), et par le maintien d'une fertilisation azotée élevée surtout sous forme de nitrates (Barna *et al.*,1985).

Et enfin l'inactivation de l'agent pathogène en pratiquant la solarisation du sol, qui consiste à couvrir le sol avec un film en plastique clair ce qui augmente la température jusqu'à 40° et 60°C, étant donné que les pathogènes sont généralement mésophiles, ces températures leur sont nuisible (Anchisi *et al.*, 1985).

#### **1.2.6.1. Lutte physique :**

Anchisi *et al* en 1985 ont développé un traitement des racines avec de l'eau chaude de 48° à 49°C pendant 30 secondes. La stérilisation et/ou la solarisation ne sont pas des solutions pratiques à long terme.

#### **1.2.6.2. Lutte chimique :**

Elle consiste en l'utilisation de fongicides systémiques ou incorporés dans le sol comme : binomyl ou le captafol qui sont des produits efficaces (Maw et Kempton, 1973). La fumigation avec le méthyl Bromide qui a montré une efficacité contre la fusariose vasculaire (Maw et Kempton, 1973).

Selon Touze *et al* en 1979 il existe plusieurs inconvénients suite à l'utilisation de ces produits chimiques :

Apparition de souches résistantes difficiles à traiter.

Déséquilibre de la microflore du sol (élimination des microorganismes qui maintiennent l'équilibre de l'écosystème).

Pollution de l'atmosphère, de l'eau et du sol.

L'intoxication des êtres vivants consommateurs des plantes traitées.

Coût élevé du traitement.

#### **1.2.6.3. Lutte génétique :**

Afin de contrôler la maladie, la lutte génétique exploite la diversité phyto-génétique. La technique consiste à introduire au niveau des plantes des gènes codant pour des protéines de défense, ces plantes sont appelées : plantes transgénétiques. Mais cette technique fut inefficace car il y a eu l'apparition de nouvelles races plus virulentes du parasite (Henni, 1998).

#### **1.2.6.4. Lutte intégrée :**

C'est la réunion de toutes les méthodes précédemment citées pour lutter contre les phytopathogènes à longue durée. Ces méthodes ne peuvent émerger que d'une meilleure connaissance des mécanismes fondamentaux qui sont à la base des interactions entre les plantes et leurs agents pathogènes (Corbaz, 1990).

#### **1.2.6.5. Lutte biologique :**

La lutte biologique est un ensemble de procédés exploitant la relation de concurrence ou d'antagonistes existant entre vivantes y compris les champignons, en vue de minimiser ou de limiter les dommages ainsi que l'abondance des agents phytopathogènes sans nécessairement les détruire par la suite (Alabouvette *et al.*, 1986).

## **1. Généralités sur le biocontrôle**

La fusariose vasculaire causée par *F. oxysporum* f.sp. *lycopersici* (Synder et Hans) est l'une des maladies les plus graves de la tomate dans le monde entier (Hariprasad *et al.*, 2011). Comme la tomate est très sensible à une multitude de maladies, cette culture est généralement traitée intensivement avec des produits agrochimiques dans l'agriculture conventionnelle (Oliveira *et al.*, 2010). Un certain nombre de fongicides chimiques de synthèse, avec des noms commerciaux et des formulations différentes, sont souvent utilisés pour lutter contre cette maladie. Le traitement chimique des champignons telluriques est généralement difficile, et les fongicides ne sont pas toujours efficaces pour lutter contre la

maladie du flétrissement fusarien car le champignon pathogène peut être saprophyte et permet l'évolution des nouvelles races (Jones *et al.*, 1991 ; Gordon et Martyn 1997). En outre, l'utilisation de produits agrochimiques pour lutter contre les maladies des plantes menace non seulement la sécurité alimentaire, mais contamine également l'environnement et les eaux souterraines, ce qui a des effets néfastes sur les organismes non ciblés (Pimentel et Levitan 1986). Étant donné que des stratégies alternatives sont nécessaires, l'application de microorganismes antagonistes dans le cadre de la lutte biologique suscite un intérêt accru (Ghyselinck *et al.*, 2013) (tableau 02).

**Tableau 02 :** Avantages et inconvénients des fongicides microbiens par rapport aux fongicides chimique (Campbel, 1989).

		Fongicide chimique	Fongicide microbien
Efficacité	<b>Spectre d'activité</b>	Généralement large	Généralement étroit
	développe souvent	Inconnu	
	<b>Type d'action</b>	préventif et curatif	Curatif seulement
Sécurité	<b>Sécurité des opérateurs</b>	Les chimiques sont dangereux	Faible risque
	dans les chaînes alimentaires	Faible à inexistant.	Accumulation
	<b>Résidu</b>	Intervalle avant la récolte souvent requis après l'application	La culture peut être récoltée immédiatement.

Le contrôle biologique des maladies de plantes est un domaine de recherches fascinant et à la fois difficile et frustrant. Il y a plus de 60 ans, les idées de base sur l'utilisation d'inoculant microbiens dans la lutte biologique ont été établies (Campbell, 1989), l'introduction de ces microorganismes se fait via les semences, le sol, ou par bactérisation des racines (Kloepper, 1993).

## 2. Diversité des microorganismes antagonistes

Parmi les microorganismes les plus étudiés quant à leur exploitation dans la lutte contre la fusariose vasculaire de la tomate, les PGPF et les PGPR occupent une place de choix. D'autres travaux ont montré l'intérêt des cyanobactéries, des mycorhizes et des bactéries

lactiques dans le biocontrôle des trachyomycoses fusariens (Lopez-seijas *et al.*, 2019 ; Yadav *et al.*, 2016).

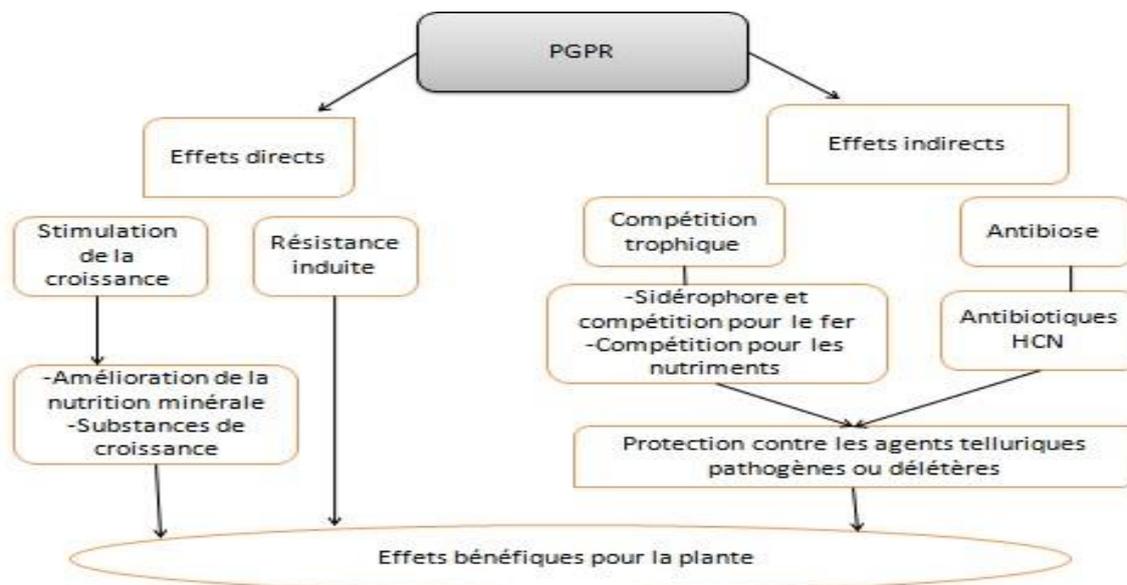
## **2.1. Les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR)**

La rhizosphère est la partie du sol riche en nutriments qui entoure les racines des plantes et constitue un habitat pour des millions de microorganismes qui se développent sur les exsudats des racines notamment les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR)(García-Salamanca *et al.*, 2013).

Divers microorganismes du sol tels que *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Azospirillum*, *Agrobacter*, *Arthrobacter*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Bradyrhizobium*, *Cellulosimicrobium*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Frankia*, *Flavobacterium*, *Klebsiella*, *Microbacterium sp.*, *Proteus sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Rhizobium sp.*, *Serratia sp.* et *Xanthomonas sp.* sont les constituants de base de la flore de la rhizosphère et présentent une forte compétence rhizosphérique (Bhattacharyya *et al.*, 2012 ; Tailor *et al.*, 2014 ; Karthik *et al.*, 2016 ; Teymouri *et al.*, 2016).

### **2.1.1. Effets bénéfiques :**

Les PGPR sont des rhizobactéries bénéfiques qui peuvent directement stimuler la croissance de l'hôte en assurant la disponibilité et l'absorption de certains macronutriments ainsi que de micronutriments, (Jaisingh *et al.*, 2016 ; Khan *et al.*, 2016 ; Prasad *et al.*, 2019), elles créent une tolérance au stress (Tiwari *et al.*, 2016), améliorent l'efficacité des engrais et contribuent à la bioremédiation. Elles peuvent également agir indirectement sur la plante en inhibant les effets néfastes de la flore pathogène (Pieterse *et al.*, 2015 ; Lecomte *et al.*, 2016 ; Jaber *et al.*, 2017) (figure 08).



**Figure 08** : Les Principaux mécanismes d'action des PGPR (Mattar, 1993).

#### 2.1.1.1. Stimulation de la croissance végétale :

La stimulation de la croissance par ces rhizobactérie se traduit par la production de métabolites secondaires analogues aux phytohormones et par l'amélioration de l'alimentation hydrominérale. En ce qui concerne la phytostimulation, certaines espèces produisent de l'acide acétique indole, des cytokinines, des gibbérellines et des inhibiteurs de la production d'éthylène (Ma *et al.*, 2016 ; Nath *et al.*, 2017).

Certaines PGPR serait capables de fixer l'azote atmosphérique et le mettent à la disposition des plantes, leur inoculation sur les cultures revitalise l'activité de promotion de la croissance, et maintient le niveau d'azote dans le sol agricole (Damam *et al.*, 2016).

La solubilisation et la minéralisation du phosphore par les PGPR (Liu *et al.*, 2012 ; Meena *et al.*, 2014 ; Shrivastava *et al.*, 2016 ; Sindhu *et al.*, 2016 ; Bahadur *et al.*, 2017) sont la conséquence de la sécrétion de différents types d'acides organiques (ex, l'acide carboxylique), qui abaisse le pH dans la rhizosphère et libère ainsi les formes de phosphate liées comme le  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  dans les sols calcaires (Sharma *et al.*, 2003).

Les PGPR améliorent aussi la capacité d'absorption du fer et la rendent sous forme assimilable pour la plante par la production de sidérophores, étant donné que cette dernière est incapable de l'assimiler sous sa forme brute (Whipps, 2001 ; Li *et al.*, 2016).

*Pseudomonas spp.* et *bacillus spp.* sont, de loin, les plus étudiées à cet égard. Les essais ont montré des augmentations en hauteur des plants de tomates (56% et 68%) ainsi que des améliorations de tous les paramètres de croissance, en particulier de la biomasse

fraîche et sèche des racines (Bergottini *et al.*, 2015 ; Fan *et al.*, 2017 ; Zerrouk *et al.*, 2019 ; Rahmoune *et al.*, 2017).

### **2.1.1.2. L'induction de la résistance systémique :**

Les PGPR peuvent aussi induire une résistance systémique (ISR) qui n'est pas précisément contre un agent pathogène spécifique mais elle joue un rôle majeur dans le contrôle d'une gamme des maladies phytopathogènes (Kamal *et al.*, 2014).

L'ISR peut être divisée en trois étapes principales ; la perception des phytohormones (l'acide jasmonique et l'éthylène) ou élicitation, la transmission d'un signal systémique dans la plante et l'expression des mécanismes de défense de l'hôte. Le système de défense est représenté par plusieurs enzymes, comme la polyphénol oxydase, la  $\beta$ -1, 3-glucanase, la chitinase, la phénylalanine ammoniac lyase, peroxydase, etc, et les espèces réactives de l'oxygène, les phytoalexines, les composés phénoliques et des protéines liées à la pathogenèse ainsi que la formation de barrières physiques comme la modification des parois cellulaires (Wiesel *et al.*, 2014 ; Ongena *et al.*, 2006).

Dans le cas de la fusariose vasculaire, plusieurs souches de *Pseudomonas spp.* fluorescents, *Bacillus spp.*, *Lysinibacter spp.* et de *Achromobacter spp.* ont la capacité d'induire la résistance systémique chez la plante de tomate avec un taux de protection allant jusqu'à 84,3% ( Benchabane, 2005 ; Ferraz *et al.*, 2014 ; Attia *et al.*, 2020).

### **2.1.1.3. La compétition trophique et spatiale :**

La compétition pour les nutriments et les espaces d'infection serait en grande partie responsable de la diminution jusqu'à 50% des attaques des phytopathogènes (Gravel, 2007 ; Benhamou *et al.*, 2012).

Globalement, la compétition s'effectue vis-à-vis des agents pathogènes sans interaction directe avec ces derniers, les PGPR produisent des enzymes qui dégradent la matière organique complexe, les glucides simples ou les acides aminés. La compétition pour les glucides combinés à la compétition pour l'azote et pour le fer, joue un rôle clé dans la suppression de la fusariose vasculaire (Köhl *et al.*, 2019).

Plus de 98 % des différents *Pseudomonas* fluorescents isolés du sol produisent des sidérophores appelés pyoverdine ou pseudobactine détectables en cas de carence en fer (Cocozza et Ercolani, 1997). Certains d'entre eux ont un grand pouvoir de chélation du fer et peuvent reconnaître et utiliser les sidérophores produits par d'autres microorganismes ce qui favorise le processus de la compétence et de la colonisation rhizosphérique (Ongena *et al.*, 2002). Les souches de *Pseudomonas aeruginosa* JO et JO7 ainsi que la souche de *Bacillus pumilus*-TolrMA réduisent l'incidence de la fusariose de la tomate jusqu'à 73% à travers la production de sidérophores (Paramanandham *et al.*, 2017 ; Heidarzadeh et Baghaee-Ravari, 2015).

#### **2.1.1.4. L'antibiose :**

Les PGPR produisent des métabolites secondaires toxiques pour l'agent pathogène cible. Ces métabolites, produits à faibles concentrations, peuvent inhiber la germination, la croissance mycélienne et/ou la sporulation des agents pathogènes (Ulloa-Ogaz *et al.*, 2015 ; Chen *et al.*, 2018 ; Goswami *et al.*, 2016 ; Ramadan *et al.*, 2016).

*Pseudomonas spp* produisent surtout des antibiotiques tels que 2,4-diacétylphloroglucinol, les phénazines, la pyolutiorine, la pyrrolnitrine (Strano *et al.*, 2017 ; Mishra et Arora, 2018). De ce fait, *Pseudomonas* P6 s'est révélé apte à diminuer de manière très sensible la fusariose vasculaire de la tomate jusqu'à des taux dépassant le seuil de 85% (Benchabane *et al.*, 2000 ; Larbaoui, 2003).

Cependant *Bacillus subtilis* a une capacité de produire la zwittermicine, la bacillomycine, la fengycine, la bacilysine et la difcidine (Maksimov *et al.*, 2011 ; Mangalanayaki *et al.*, 2016). De plus, *Paenibacillus ehimensis* s'est avéré une souche productrice de composés organiques extracellulaires et d'une enzyme brute qui agissent contre Fol (Naing *et al.*, 2014). Ainsi que l'endobactérie *Burkholderia rinojensis* qui produit une nanoparticule toxique pour Fol (oxyde de Magnésium MgONPs), avec un taux d'inhibition jusqu'à 100% (Abdel-Aziz *et al.*, 2020).

#### **2.1.1.5. Les composés organiques volatils (COV) :**

Ils sont de nature lipophile avec une petite taille, une odeur caractéristique et une pression de vapeur élevée, ce qui leur permet de passer facilement à travers les membranes, l'environnement du sol et l'atmosphère et se propager sur de longues distances (Pichersky *et al.*, 2006). De petites concentrations de COV produits par les PGPR sont impliquées dans le contrôle biologique en induisant la résistance systémique chez la plante contre les différents pathogènes, dont ils servent de médiateurs pour la connexion entre la plante et l'agent antagoniste (Morath *et al.*, 2012 ; Cordero *et al.*, 2014 ; Velivelli *et al.*, 2015). Ils servent également de produits finaux dans la biosynthèse des monoterpènes, sesquiterpènes, cétones, alcools, esters, lactones, dérivés du benzène et des acides gras, etc (Korpi *et al.*, 2009 ; Stoppacher *et al.*, 2010 ; Bitas *et al.*, 2013).

Diverses espèces de *Bacillus* produisent ces composés, à savoir, des phénylpropanoïdes, des dérivés d'acide gras et un mélange complexe de terpénoïdes et de lactones volatiles qui présentent des propriétés antibiotiques (Elshafie *et al.*, 2013). Une étude récente élaboré par Jangir *et al.*, (2018) a mis en évidence l'inhibition de Fol par *B. subtilis* 2274 (85,7 %) via la production de ces composés. En outre, Kong *et al.*, (2020) ont rapporté que le composé 1-undécène de la souche *Pseudomonas chlororaphis* ST-tj4 a fortement inhibé la croissance mycélienne du phytopathogène plus que les substances diffusibles.

Le HCN est un composé antimicrobien volatil connu pour son rôle dans la suppression des maladies (Rijavec et Lapanje 2017 ; Jain et Das 2016), l'inhibition de la chaîne de transport des électrons et l'approvisionnement en énergie de la cellule. Il inhibe aussi l'action du cytochrome oxydase (Heydari et Mohammad 2010). Cette propriété délétère permet au PGPR d'acquérir un avantage concurrentiel évident parmi la communauté microbienne tellurique (Ramette *et al.*, 2003 ; Hayat *et al.*, 2010). *Bacillus* et *Pseudomonas* sont les principaux producteurs du HCN (Mishra et Arora, 2018 ; Sehrawat et Sindhu, 2019). De ce fait, les essais ont montré que *Pseudomonas* sp a réduit la croissance de Fol grâce à la production de ce métabolite (Lachisa et Dabassa, 2016 ; Someya *et al.*, 2006). Une autre espèce *Brevundimonas olei* Prd2 s'est également montré efficace dans la réduction de Fol (44.99%) via la production de l'HCN (Isalm *et al.*, 2019).

#### **2.1.1.6. Les enzymes hydrolytiques :**

La dégradation de la paroi cellulaire des champignons pathogènes par la sécrétion d'enzymes lytiques (la cellulase, la chitinase, la protéase, etc) est une activité antifongique qui contribue au biocontrôle des phytopathogènes (Jadhav *et al.*, 2017 ; Mabood *et al.*, 2014 ; Aeron *et al.*, 2011).

Des données récentes indiquent clairement que la sécrétion de la chitinase, la cellulase, la protéase et de la  $\beta$  -1,3 glucanase par des isolats de *streptomyces*, de *Bacillus* et de *Pseudomonas* joue un rôle principal dans la dégradation de Fol (Abassi *et al.*, 2019 ; Jangir *et al.*, 2018 ; Kong *et al.*, 2020).

Globalement, l'action des métabolites est bien liée avec la production des enzymes par l'agent de biocontrôle. Il a été signalé que l'effet des enzymes et antibiotiques produits par les microorganismes donne une efficacité plus élevée de la lutte biologique par rapport à l'antagonisme obtenue par l'un ou l'autre mécanisme seul car les enzymes de dégradation de la paroi cellulaire sont nécessaires pour l'entrée des antibiotiques et les métabolites antifongiques à l'intérieure du pathogène (Howell, 2003 ; Monte, 2001).

#### **2.2. Les champignons favorisant la croissance des plantes (PGPF)**

Les champignons favorisant la croissance des plantes (PGPF) sont des champignons non pathogènes, saprotrophes, qui vivent librement à la surface des racines, à l'intérieur de la racine elle-même ou dans la rhizosphère (Bent 2006). Ils ont plusieurs effets positifs sur la plante hôte, à savoir, l'amélioration de la germination des semis et l'élongation des pousses. Certains peuvent aussi affecter le développement des racines et stimuler une floraison précoce. D'autres ont la possibilité d'améliorer la capacité photosynthétique de la plante et stimuler la production de métabolites secondaires de l'hôte. Ils ont également la capacité de protéger les plantes contre les microorganismes nuisibles notamment les champignons. Par conséquent, ils sont considérés comme des ingrédients actifs potentiels dans la formulation des biofertilisants et des mycofongicides (Pieterse *et al.*, 2014). En moyenne, 44% des isolats fongiques de la rhizosphère étaient PGPF (Hyakumachi, 1994). Parmi eux, *Trichoderma* et quelques souches non pathogènes appartenant au genre *Fusarium*, ils ont une large distribution et sont, de loin, les plus largement signalés comme étant agents de biocontrôle contre *Fusarium oxysporum f.sp. lycopersici*.

Le genre *Trichoderma* regroupe un ensemble de champignons filamenteux, imparfaits et saprophytes (Caron et Laverdière, 2012). En raison de leur capacité de reproduction élevée, leur résistance dans des conditions défavorables, de leur efficacité dans l'utilisation des nutriments, de leur agressivité vigoureuse contre les agents pathogènes des plantes, de leur efficacité dans la promotion de la croissance et des mécanismes de défense des plantes (Suleiman *et al.*, 2019 ; Ramirez-Carino *et al.*, 2020 ; Sallam *et al.*, 2019).

La capacité des différentes espèces non pathogènes de *Fusarium* dans la gestion des maladies a été rapportée dans de nombreuses études. Ces souches diffèrent non seulement par leur efficacité et leur mode d'action, mais aussi par leur caractéristique génotypique et phénotypique (Van der *et al.*, 1986). Plusieurs de ces souches ont montré une forte capacité inhibitrice vis-à-vis des fusarioses vasculaires, parmi elles, la souche Fo47 active, utilisée comme souche modèle dans la bioprotection des plantes vis-à-vis des formes pathogènes de Fo. Du point de vue théorique, l'interaction entre les souches pathogènes et non pathogènes de *Fusarium* tient place au niveau du sol, au niveau de la rhizosphère mais également à l'intérieur des racines (Alabouvette *et al.*, 1982). Il est également à noter que les *Fusarium* non pathogènes jouent un rôle prépondérant dans les actions d'inhibition des fusarioses dans les sols suppressifs (Rouxel *et al.*, 1979).

### **2.2.1. Mécanismes d'action**

Les *Trichoderma* et les souches non pathogènes de *Fusarium* agissent à travers un ou plusieurs modes d'actions en même temps, ces mécanismes comprennent la compétition trophique et spatiale, l'induction d'une résistance systémique, la promotion de la croissance de la plante, la sécrétion d'enzymes lytiques, ainsi que le mycoparasitisme et l'antibiose qui concernent particulièrement le genre *Trichoderma* (tableau 03).

**Tableau 03** : mécanismes d'action des PGPF contre la fusariose vasculaire de la tomate

<b>PGPF</b>	<b>Mécanisme</b>	<b>Résultat</b>	<b>Référence</b>
<i>Trichoderma longibranchium</i>	ISR	Déminution de la gravité de la maladie (24,8%), inhibition de Fol (59,33%).	Sallem <i>et al.</i> ,(2019)
<i>T.virens</i> (TriV-JSB100)	ISR	Réduction de l'incidence de la maladie (à 33,4%).	Jogaiah <i>et al.</i> ,(2017)
<i>T.harzianum</i>	PGP	Hauteur de plante, nombre de branche par plante, poids frais et poids sec améliorés (77,6 cm, 5,75/plante, 552,9 g et 87,13g respectivement).	Khalil et Shimaa, (2020).
<i>T.virens</i> (Tv911)	PGP	Augmentation de la hauteur des plantes avec (50,26%).	Zaw et Matsumoto, (2020).
<i>T.asperellum</i> (MK045610)	Production de 3,5bis(1,1-diméthyléthyl) et acide pentadécanoïque	Réduction de la croissance du mycélium	Sonkar, (2019).
<i>T.asperelloides</i> (DSL4)	mycoparasitisme	Réduction de l'incidence de la maladie (76,9%).	Ramírez-Cariño <i>et al.</i> , (2020).

<i>T. asperellum</i> Ts-12	Compétition trophique et spatiale.	Réduction de l'incidence de la maladie et des symptômes foliaires (39,2%, 47% respectivement).	El-Koumy <i>et al.</i> ,(2016).
<i>T. asperellum</i> CWD78CHF	Enzymes lytiques (chitinase, protéase)	Inhibition de la croissance mycélienne (de 74,24% à 96,91%).	Li <i>et al.</i> , (2018).
<i>Fusarium oxysporum</i> non pathogène	ISR	Changement dans les activités des enzymes liés a la défense.	Patil <i>et al.</i> ,(2011).
<i>F. oxysporum</i> 37	ISR	Inhibition de la croissance de Fol (50%).	Joshi <i>et al.</i> ,(2013).
<i>Fusarium</i> NPF u7	ISR	Inhibition de la croissance de Fol (32,16%).	Patil <i>et al.</i> ,(2018).
<i>Fusarium oxysporum</i> non pathogène	Compétion spatiale et trophique	Diminution du degré de la gravité de la maladie (1,83/6).	Silva <i>et al.</i> ,(2010).

## 2.3. Les mycorhizes

Les mycorhizes se définissent comme des associations durables impliquant des échanges à bénéfices réciproques, (Smith et Read, 2008). Les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) sont des biotrophes obligatoires qui colonisent la majorité des plantes (Filho *et al.*, 2016). Ils sont présents dans la plupart des écosystèmes terrestres (Brundrett 1991). Ces champignons colonisent les racines de plus de 90% des espèces végétales, au bénéfice mutuel de la plante hôte et du champignon. Ce dernier obtient une source de carbone dérivée de la photosynthèse végétale et n'a donc pas à rivaliser pour le carbone rare de la rhizosphère pour survivre et proliférer et la plante hôte reçoit plusieurs avantages notamment ; l'amélioration de sa croissance, l'absorption d'eau et de nutriments et une meilleure accessibilité aux oligo-éléments (cuivre, zinc, fer), de plus, le CMA peut améliorer la tolérance des plantes à de nombreux stress abiotiques tels que la salinité et à la sécheresse et biotiques comme la résistance aux maladies fongiques (Wang *et al.*, 2017).

Les mycorhizes peuvent, seules ou en combinaison avec un autre agent de lutte biologique, contrôler de nombreux agents pathogènes fongiques des plantes, à savoir, *Fusarium sp* (Filho *et al.*, 2016). Dans ce contexte, le potentiel des CMA comme agents de lutte biologique a été répertorié chez plusieurs espèces comme : *Funneliformis mosseae*, *Glomus intraradices*, *Rhizophagus irregularis* et *Gliocladium fimbriatum* (Gao *et al.*, 2018 ; Fitriani *et al.*, 2019). Divers mécanismes d'action émergent de ces investigations, au niveau de la plante, du parasite et de la microflore du sol.

### 1.1.1. Mécanismes d'action

En fonction de la maladie et des conditions environnementales, les mécanismes probables expliquant l'activité de biocontrôle des CMA peuvent inclure une compétition directe avec le pathogène pour les produits photosynthétiques et / ou les sites de colonisation, et / ou un changement de la composition microbienne rhizosphérique (Al-Askar *et al.*, 2010). En outre, ils peuvent contrôler la maladie via l'amélioration de la santé des plantes, la modification morphologique de la racine de la plante et /ou l'induction d'une résistance (Majewska *et al.*, 2017).

Le CMA concurrence l'agent pathogène pour la source de carbone ainsi que pour les tissus racinaires lors d'une colonisation simultanée où les hyphes micorhiziens saturant

davantage les sites d'infection disponibles, limitant ainsi la pénétration des hyphes pathogènes, ce qui pourrait jouer un rôle important dans le développement de ces deux microorganismes (Smith, 1988 ; Azcon-Aguilar et Barea 1996). Ces champignons ont aussi la capacité de modifier l'architecture de la racine végétale entraînant une ramification accrue du système racinaire, un raccourcissement des racines adventives ou une augmentation des racines fines (Gamalero *et al.*, 2004). La ramification intense des racines induite par la mycorhization s'accompagne d'un changement qualitatif et quantitatif dans la composition des exsudats racinaires (Harrier et Watson 2004). Il en résulte une légère baisse du pH du sol suffisant pour retarder la sporulation ou ralentir le métabolisme des phytopathogènes (Norman et Hooker 2000). De plus, Les multiples implications des mycorhizes dans la rhizosphère peuvent modeler la microflore microbienne de façon à remédier à la prolifération du pathogène, ces changements peuvent stimuler la synthèse de composés produits par les microorganismes antagonistes (Jung *et al.*, 2012), tels que les antibiotiques (Siasou *et al.*, 2009). Certains mycorhizes interagissent aussi avec les agents antagonistes de lutte biologique stimulant à la fois la colonisation racinaire et réduisant l'incidence de la maladie (Paulitz et Linderman 1991). En outre, les mycorhizes contribuent à l'augmentation de la croissance et à l'amélioration de la santé des plantes, ce qui se traduit par une vigueur accrue qui leur permet de mieux tolérer les stress environnementaux dont ceux causés par diverses maladies (Azcon-Aguilar et Barea 1996). Et enfin, Les CMA peuvent stimuler les moyens de défense de la plante de manière systémique ou locale par l'augmentation de la concentration en métabolite phénolique induisant une augmentation de la lignification et la formation d'une barrière physique vis-à-vis du pathogène (Morandi, 1996) ou par la stimulation de voies métaboliques qui mènent à une résistance plus importante de la plante (Liu *et al.*, 2007).

A titre d'exemple, une étude menée par Ren *et al.*, (2010) dans laquelle ils ont montré que *Glomus etunicatum* a considérablement augmenté le nombre des actinomycètes ( $3.67 \times 10^5$ ), ce qui a conduit à une réduction importante de nombre de Fol (95%) dans les plants des tomates. Bidellaoui *et al.*, (2018) ont également montré que l'inoculation de la souche *Rhizophagus irregularis* à des plantes de tomate infectées par Fol, a diminué le taux de l'incidence de la maladie jusqu'à 20%, a augmenté la hauteur de la plante (jusqu'à 40 cm), la teneur des feuilles en chlorophylle (45 unités arbitraires SPAD), par rapport aux plantes témoins et malades et a également induit une plus grande accumulation de P, K, Zn, Cu et Mo, améliorant ainsi l'absorption et la croissance des nutriments.

## 2.4. Les cyanobactéries

Les cyanobactéries appartiennent au groupe des bactéries Gram négatif ayant des propriétés de photolyse dégageant de l'oxygène et de fixation d'azote (Ressom *et al.*, 1994 ; Codd, 1995). Ce sont des procaryotes cosmopolites qui ont survécu et ont explosé sur la terre pendant plus de deux milliards d'années et qui ont contribué à la formation d'un environnement oxygéné (Sergeeva *et al.*, 2002). Les cyanobactéries peuvent survivre dans presque tous les habitats (Baracaldo *et al.*, 2005), ce qui fait d'elles une riche source de divers métabolites d'intérêt pharmaceutique ou toxicologique comme les métabolites primaires et secondaires qui présentent différentes bioactivités (antifongiques, antivirales, antibiotiques et autres) (Carmichael, 1992 ; Rinehart *et al.*, 1994 ; Borowitzka, 1995). De ce fait, leurs extraits sont couramment utilisés dans l'agronomie, car elles stimulent la vigueur et la productivité des plantes, elles sont aussi connues pour leur effet contre les champignons pathogènes (Husaini et Neri 2016). Plusieurs espèces sont actuellement employées comme agent de biocontrôle, chez la tomate, à titre d'exemple ; *Nostoc commune* (Kim et Kim, 2008) et *Anabaena variabilis* RPN59 (Chaudhary *et al.*, 2012).

### 2.4.1. Mécanismes d'action

Les cyanobactéries sont connues pour la libération de divers types de substances bioactives comme les vitamines, les polysaccharides et les phytohormones qui fonctionnent comme des molécules élicitrices efficaces contre la croissance des colonies fongiques de plusieurs phytopathogènes en activant les gènes responsables de la résistance chez la plante et/ou comme des molécules antifongiques qui inhibent directement la croissance mycélienne (Singh et Shachi, 2014).

La production de phytohormones a été signalée principalement à partir de cyanobactéries isolées des champs de culture. Des études montrent que les cyanobactéries peuvent produire des régulateurs de croissance similaires à l'IAA, la cytokinine, la gibbérelline, l'éthylène, l'acide jasmonique ou les acides abscissiques. A cet effet, il a été rapporté que le flétrissement fusarien induit une accumulation d'acide abscissique qui assure la survie de la

plante dans des conditions de stress, la production d'acide abscisique a été remarqué chez *N. muscorum*, *Trichormus variabilis* et *Synechococcus leopoliensis* (Khan *et al.*, 2012).

Les cyanobactéries produisent aussi des exopolysaccharides qui sont l'une des principales classes d'inducteurs de l'immunité des plantes (Coté et Hahn 1994), induisant la production de NO, l'influx calcique, l'accumulation de transcrits du gène PR et les altérations de la paroi cellulaire qui incluent le dépôt de callose et de composés phénoliques (Silipo *et al.*, 2010). Dans une autre étude, des enzymes de défense telles que la phénylalanine ammoniac lyase, la polyphénoloxydase et l'activité enzymatique liée à la pathogenèse, y compris l'activité de la chitosanase et de la  $\beta$ -1,3 glucanase, était la plus élevée dans les racines des plants de tomates traités avec des formulations cyanobactériennes d'*Anabaena variabilis* RAN59 et *A. laxa* RAN8 (Prasanna *et al.*, 2013).

Les cyanobactéries sont connues également pour être riches en vitamines, où plusieurs souches de cyanobactéries, telles que *Spirulina*, *Anabaena sp.*, *Anabaena flosaquae*, *Anabaena hassali*, *Microcystis pulverana*, *Nostoc sp.*, *Nostoc punctiforme*, *Phormidium bijugatum*, *Oscillatoria jatorvensis* et *Chroococcus minulus* sont signalées pour contenir de la thiamine (vitamine B1), riboflavine (vitamine B2), acide folique, acide ascorbique, acide nicotinique (vitamin B3), cyanocobalamine (vitamine B12) et pentothène (Robbins *et al.*, 1951; Koptera 1970; Aaronson *et al.*, 1977; Shah et Vaidya, 1977). La thiamine par exemple, active les gènes liés à la SAR (résistance acquise systémique) dans la tomate et prévient plusieurs maladies causées par des infections fongiques, bactériennes et virales (Ahn *et al.*, 2005).

Dans le cas de la fusariose vasculaire de la tomate plusieurs études ont montré l'importance des cyanobactéries dans la diminution de la maladie in vitro et in situ, quantitativement et qualitativement (Kim et Kim, 2008 ; Kumar *et al.*, 2019). Dans une autre étude élaborée par Alwathnani et Perveen (2012), les graines de tomate traitées avec *Nostoc lickeria*, ensuite infestées par Fol, ont exprimé une germination maximale (93%) par rapport aux graines non traitées.

## **2.5. Les bactéries lactiques :**

Les bactéries lactiques (LAB) ont également été étudiées en tant que possibles agents de biocontrôle (BCA), démontrant leur efficacité contre les bactéries, les levures et surtout les champignons filamenteux (dalié *et al.*, 2010). Diverses souches appartenant au groupe des

LAB ont fait preuve d'une réduction de la maladie et d'inhibition de la croissance du phytopathogène, à savoir ; *Lactobacillus plantarum* MiLAB 393, *L. coryniformis* Si3, *Pediococcus pentosaceus* MiLAB 170 et *L. sakei* (Sjögren et al., 2003 ; Magnusson et al., 2003 ; Yang et Chang, 2010 ; Lavermicocca et al., 2000 ; Ström et al., 2002 ; Anas et al., 2008 ; Amin et al., 2009 ; Askari et al., 2012).

### 2.5.1. Mécanismes d'action :

Cette capacité antagoniste et bio-protectrice est attribuée à la compétition pour les nutriments (colonisation) et à l'antibiose par la synthèse de différents composés antimicrobiens (Carmona-Hernandez et al., 2019), y compris les acides organiques, les bactériocines, le peroxyde d'hydrogène et les acides gras hydroxylés (Lamont et al., 2017) acidepyrrolidone-5-carboxylique, diacétyl et reutéline (aldéhyde b-OHpropionique) (Stoyanova et al., 2012) et en modifiant la réponse immunitaire des plantes (Konappa et al., 2016). Cependant, il y a peu de preuves qui montrent que ces microorganismes jouent un rôle dans la stimulation de la croissance des plantes par la production de phytohormones. Il a été signalé que certaines souches de *Lactobacillus* produisent des cytokines et de l'IAA (Mohite, 2013 ; Shrestha et al., 2014 ; Giassi et al., 2016 ; Lynch, 1985), alors que d'autres n'en produisent pas (Kang et al., 2015).

A cet égard, dans une étude menée par Lopez-seijas et al., (2019), des souches de bactéries lactiques du vin appartenant aux espèces *Lactobacillus plantarum* (LPLUV10), *L. paracasei* (LPAUV12), ont été utilisées pour des essais d'antagonisme contre Fol sur les plants de tomates adultes. Le degré d'inhibition varie entre 55 % (souche LPLUV10) lorsque les bactéries et le champignon sont inoculés simultanément et 76 % (souche LPAUV7) lorsque la bactérie est préalablement cultivée pendant 48h. L'activité antifongique de ces LAB a été attribuée à leur capacité à produire et à libérer des métabolites tels que la reutéline, les acides organiques ou les composés phénoliques (Dalié et al., 2010) ainsi que des substances antifongiques de nature protéique (Gerez et al., 2013). De plus, la souche *L. plantarum* LPLUV10 a présenté une augmentation significative du poids sec (environ 24%), cette augmentation représente environ 41% par rapport aux plantes infectées par Fol (figure 09).

D'une autre part, il a été montré que, les LAB sont capables de réduire l'effet pernicieux de Fol sur les plants de tomates provenant d'un habitat différent, démontrant ainsi une efficacité potentielle à plus large spectre (Lopez-seijas et al., 2019) contrairement aux bactéries rhizosphériques (Vaikuntapu et al., 2014).



**Figure 09** : La capacité de bio-protection des bactéries lactiques étudiées (Lopez-seijas *et al.*, 2019).

### **3. Stratégies de biocontrôle de la fusariose vasculaire :**

#### **3.1. Combinaison des microorganismes**

Pour rendre le contrôle biologique plus réussie, une stratégie consiste en l'association de plusieurs agents de biocontrôle ayant des modes d'actions complémentaire en un seul produit, ça pourrait résoudre à la fois le problème du manque de cohérence de la lutte biologique et celui de la spécificité des cibles. En effet, si les micro-organismes choisis expriment différents modes d'action, ils pourraient contrôler plusieurs champignons pathogènes en même temps et leur efficacité sera moins dépendante des facteurs environnementaux.

Le concept d'association de plusieurs microorganismes provient de l'étude des sols suppressifs des maladies induites par les phytopathogènes du sol. En effet, le contrôle fourni par les interactions responsables de la suppression des sols est plus consistant et stable avec le temps par rapport au contrôle fourni par une seule souche antagoniste. Pour cela, il est nécessaire d'introduire un mélange de souches antagonistes dans un sol propice pour imiter l'environnement naturel des sols suppressifs des maladies (Alabouvette *et al.*, 2001).

Des publications récentes suggèrent que le consortium d'ABC contribue à réduire l'incidence de la maladie par une action synergique (Chemeltorit *et al.*, 2017 ; Duijff *et al.*, 1999 ; Jambhulkar *et al.*, 2018 ; Liu *et al.*, 2018 ; Panebianco *et al.*, 2015), y compris la tomate

(Marian *et al.*,2019 ; Tayal *et al.*,2011). En effet, l'activité antagoniste de *Trichoderma harzianum*, *Bacillus subtilis*, *Azospirillum brasilense*, *T. viridae* et *Aspurgillus niger* utilisés en association contre Fol a été (Jangir *et al.*, 2019 ; Khalil et Shimaa, 2020 ; Nikhat *et al.*, 2019)

### 3.2. Sols résistants :

Les sols résistants ont été décrits par Baker et Cook (1974) comme des sols dans lesquels la sévérité ou l'incidence d'une maladie restent limitées, malgré la présence de l'agent pathogène, d'une plante hôte sensible, et de conditions climatiques favorables au développement de la maladie. Le pouvoir suppressif naturel des sols face au flétrissement fusarien a été reconnu pour la première fois au XIXe siècle par Atkinson *et al.*, (1975) et a ensuite été décrit pour d'autres sols dans le monde entier (Dominguez *et al.*, 2001). Le pouvoir suppressif est spécifique aux fusarioses vasculaires et n'est pas efficace contre les maladies causées par les espèces de *Fusarium* non vasculaires, notamment *F. roseum* et *F. solani*, *F. subglutinans*, ou d'autres pathogènes du sol (Deacon et Berry 1993 ; Fravel *et al.* 2003).

La capacité de suppression du sol a été attribuée à des facteurs biotiques et abiotiques, ou à une combinaison de ceux-ci, et elle diffère d'un pathogène à l'autre (Weller *et al.*, 2002). Les études sur la suppression des maladies ont montré qu'elle résulte des interactions microbiennes plus ou moins complexes entre l'agent pathogène et une partie de la microflore saprophyte. En effet, l'effet suppressif disparaît lors de la destruction des microorganismes par les traitements biocides et peut être restauré en mélangeant une petite quantité de sol suppressif à un sol préalablement traité thermiquement (Shipton *et al.*, 1973 ; Louvet *et al.*, 1976 ; Scherand Baker, 1980). D'autres études ont établi une corrélation entre le type de sol, la présence d'argiles et la suppression des flétrissures dues au *fusarium* (Stover 1962). De nombreux autres facteurs abiotiques tels que la texture du sol, le potentiel hydrique, l'aération, le pH, la teneur en matière organique, la disponibilité en cations (Al, Fe, Mn) sont indirectement impliqués dans les mécanismes de suppression de la maladie, mais il est difficile de généraliser d'un sol à l'autre (Hoeper et Alabouvette 1996). Les pratiques culturales telles que les monocultures peuvent également jouer un rôle important dans la capacité de suppression du sol (Baker et Chet ,1982).

Les sols suppressifs sont classés en deux types : Sols à répression générale ou antagonisme non spécifique associée à la biomasse microbienne totale du sol qui entre en compétition avec l'agent pathogène pour les ressources ou qui entraîne la suppression par des types d'antagonisme plus directs. (Rovira et Wildermuth, 1981 ; Rani et Sudini, 2013) et

les sols à répression spécifique, qui résulte de l'inhibition directe d'un pathogène connu par un microorganisme. Dans certains cas, un agent de lutte biologique est introduit dans le sol pour réduire spécifiquement l'apparition de la maladie (Shipton *et al.*, 1973 ; Kariuki et Dickson 2007).

La capacité de suppression naturelle du sol peut être augmentée par un compost de qualité qui résulte de la transformation des déchets agricoles ce qui constitue un changement de perspective intéressant (Bosco *et al.*, 2017 ; Nguyen *et al.*, 2019 ; Ram *et al.*, 2019). La production de compost supprimant les maladies représente une possibilité concrète et commercialisable d'exploiter une source riche et précieuse de microbiote pour renforcer les propriétés suppressives des sols favorables ou faiblement suppressifs, elle constitue donc une alternative prometteuse aux produits chimiques de synthèse (De Corato, 2020 ; Mehta *et al.*, 2014).

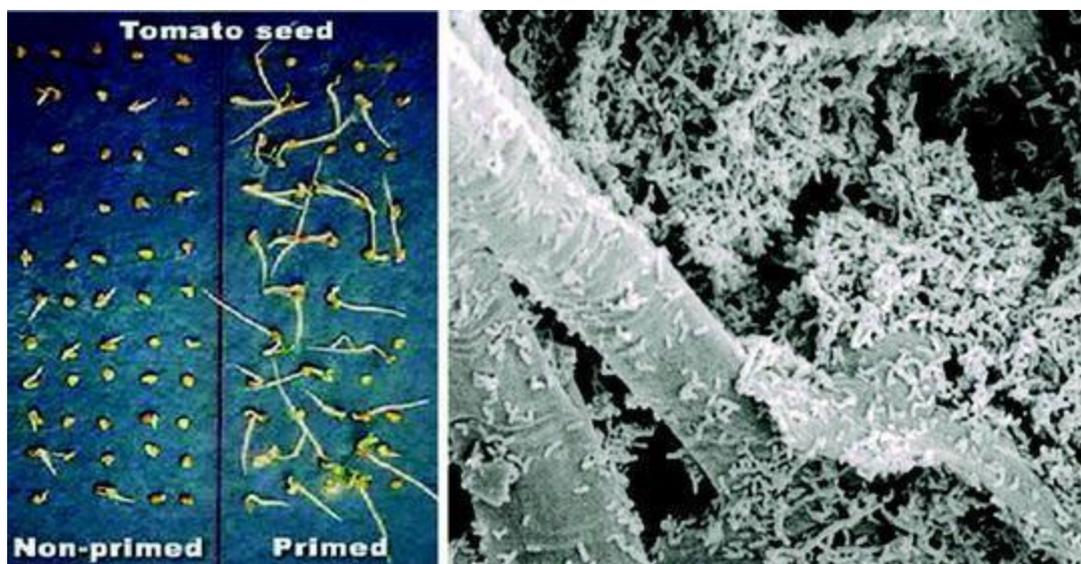
### **3.3. Enrobage des graines**

Plusieurs facteurs affectent la survie des bactéries dans le sol comprenant certains facteurs abiotiques, notamment la température, l'humidité et le pH du sol (García *et al.*, 2010), donc le biopriming des semences est une alternative ciblée, car elle assure l'entrée des bactéries dans les graines tout en évitant les effets indésirables des facteurs abiotiques.

Parmi les différentes techniques de priming, on a le bio-priming qui est un traitement pré-germinatif qui consiste à tremper les graines dans une suspension microbienne pendant une période de temps précalculée pour permettre l'imbibition microbienne dans la graine (Abuamsha *et al.*, 2011). Reddy (2013) a davantage le bio-priming dans l'aspect de la lutte biologique comme l'application d'un inoculum microbien bénéfique aux graines et leur hydratation pour lutter contre les maladies. Les microorganismes qui ont été couramment étudiés à cette fin comprennent *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Trichoderma harzianum* et *T. viridae* (El-Mougy et Abdel-Kader, 2008 ; Junges *et al.*, 2013 ; Alzandi *et al.*, 2019).

Le trempage des graines en suspension microbienne initie les processus physiologiques de la graine en veillant à ce que l'émergence des plumules et des racines soient empêchées (Anitha *et al.*, 2013). Le PGPM continue de se multiplier dans la graine et prolifère dans la spermosphère (Taylor et Harman 1990). Cette prolifération est 10 fois supérieure à celle des

agents pathogènes attaquant, ce qui permet à la plante de survivre à ces derniers (Callan *et al.*, 1990). Ainsi, le semis d'une graine amorcée peut conduire à une progéniture sans maladies avec une activité de promotion de la croissance végétale améliorée et un nombre réduit de sites d'infection (figure 10) (Rajput *et al.*, 2019).



**Figure 10** : Gauche - bio-amorçage des graines de tomates. Droite - *Pseudomonas aureofaciens* AB 254 sur la surface des poils des graines de tomate (Reddy, 2013)

Cette méthode nécessite l'utilisation d'adhésifs pour assurer un revêtement adéquat et homogène de la graine, ce qui empêche l'application ultérieure de pesticides (Bardin et Huang 2003), l'utilisation de ces adhésifs est conçue aussi pour assurer le collage des PGPM sur les semences et éviter la dessiccation de l'inoculum (Elegba et Rennie 1984). Parmi les agents adhésifs les plus couramment utilisés sont la gomme arabique, la solution de sucre, la méthylcellulose, la polyvinylpyrrolidone, les sels de caséinate et le polyvinylacétate (Deaker *et al.*, 2004).

La méthode couramment recommandée pour le bio-priming est de tremper les graines dans l'eau pendant 12 h. Le produit formulé sélectionné du microorganisme est ajouté aux graines pré-trempées (10 g / kg de graines) et bien mélanger. Les graines traitées peuvent être prises dans des sacs en polyéthylène, entassées et recouvertes d'un sac de jute humide pour maintenir une humidité élevée et maintenues pendant 48 h à environ 25–32 ° C. Pendant cette période, le bioagent adhérent à la graine se développe à la surface pour former une

couche protectrice tout autour du tégument. Certaines études ont montré que les graines bio-amorcées peuvent être stockées en toute sécurité jusqu'à 2 mois (Siddegowda *et al.*, 2016).

### **3.3.1. Rôle de l'enrobage des graines**

#### **3.3.1.1. Rôle de l'enrobage des semences contre la fusariose vasculaire**

C'est une approche attrayante, dans laquelle les microorganismes continuent de se multiplier et forment un biofilm autour de la surface racinaire ce qui contribue à réduire l'infection en agissant par compétition spatiale (Prasad *et al.*, 2016). Le biopriming avec PGPM aide également à initialiser la résistance systémique des plantes (Mahmood et Kataoka, 2018). A cet égard Srivastava *et al.*, (2010) ont prouvé que l'application de *P. fluorescens* et *T. harzianum* a réduit de manière significative l'incidence de la fusariose vasculaire de 74 % et 67 % respectivement. Dans une autre étude menée par Alzandi et Naguib, (2019) deux groupes de graines de tomates ont été utilisés, le premier a été maintenu au sec et le second a été préparé avec des métabolites de *Pseudomonas fluorescens* et planté dans des conditions d'infection par *Fusarium*. Le groupe amorcé peut résister à l'infection, tandis que la plante non amorcée ne peut pas. Le succès du groupe amorcé pour combattre l'infection est attribué à l'induction d'une résistance systémique. Cette induction est apparue dans l'augmentation des molécules de transduction du signal. Ces molécules signal induisent l'activité des enzymes de défense. Le biopriming des graines de tomate avec un isolat de *Trichoderma* (Th-CARI- 50) était plus efficace dans la réduction de l'incidence de la maladie de la fusariose vasculaire (80%) qu'avec l'application de semences seules (Bhagat *et al.*, 2013). De même, une autre expérience utilisant *T. asperellum* BHU-P-1 et *Ochrobactrum sp.* en tant qu'agents de bio-priming a conduit à une réponse significative de défense et a permis de réduire l'incidence de la maladie (jusqu'à 28%) (Singh *et al.*, 2020).

#### **3.3.1.2. Rôle de l'enrobage des semences dans l'augmentation de la productivité des cultures de tomate :**

La promotion de la croissance et de la productivité des plantes par le PGPM appliqué par enrobage liée aux activités de PGP, a été largement examinés (Goswami *et al.*, 2016). Les principales contributions microbiennes à l'amélioration de la productivité des plantes comprennent la fixation de l'azote ; une solubilité et une disponibilité accrues du phosphore, du potassium et du fer ; production d'hormones, de vitamines, d'enzymes et d'acides organiques à partir de bactéries ; la facilitation de l'absorption des nutriments par les hyphes ; et la libération de plusieurs métabolites des champignons (Mahmood et Kataoka, 2018). De

ce fait, le traitement des semences de tomate avec une souche bactériennes d'*Enterobacter spp.* P-39a influencé la germination et l'indice de vigueur des plantules de tomate par rapport aux semences non traitées. L'isolat P-39 a enregistré un pourcentage de germination élevé (50 à 80%) (Bhatt *et al.*, 2015). Dans le même contexte, Srivastava *et al.*, (2010) ont aussi démontré que l'enrobage des graines de tomate avec *T. harzianum* de *Pseudomonas fluorescens* a considérablement augmenté la germination des semences (22%, 48%, respectivement) et a réduit les jours nécessaires à cette dernière (2,0–2,5 jours). En outre, le bio-priming des graines de tomates avec *Trichoderma viridae*, *T. harzianum* et *Pseudomonas fluorescens* a amélioré la germination de la tomate (93,1%) et la vigueur des plantules (95,33%) à la fois en pépinière et au champ (Viorica *et al.*, 2017).

### **3.4. Amélioration génétique des agents de biocontrôle :**

Cette approche peut constituer une alternative puissante au développement des pesticides chimiques car la demande d'agents de lutte biologique plus efficaces contre les maladies des plantes augmente, tirée par la croissance du marché de la production d'aliments biologiques. Il est donc possible d'accroître les performances du biocontrôle en renforçant la capacité antagoniste ou l'agressivité des ABCM contre les phytopathogènes (par exemple, par la production de composés antimicrobiens) et en améliorant la capacité de colonisation des ABCMs par l'identification des gènes associés aux mécanismes de biocontrôle et/ou les gènes pourraient être intégrés dans un seul ABCM (Marian et Shimizu, 2019 ; Baker, Green et Loker, 2020).

#### **3.4.1. L'amélioration de la production des composés antifongiques**

L'efficacité de la lutte biologique a déjà été améliorée en augmentant la capacité à produire des antibiotiques, des enzymes hydrolytiques et des bactériocines. Par exemple un mutant ret S de *Pseudomonas Protegens* PF 5 qui a produit des niveaux plus élevés du métabolite antifongique 2,4-diacétylphloroglucinol par rapport au parent. Une autre souche recombinante de *Pseudomonas fluorescens* a également supprimé la maladie du blé dans une plus large mesure que la souche de type sauvage par l'introduction d'un opéron de 7 gènes de biosynthèse d'acide phenazine-1-carboxylic de *Pseudomonas synxantha* qui produit

le lipopeptide cyclique antifongique (Bilal *et al.*, 2017 ; Jing *et al.*, 2018 ; Sun *et al.*, 2017 ; Tang *et al.*, 2019 ; Yang *et al.*, 2017 ; Zhou *et al.*, 2014).

### **3.4.2. Amélioration de la capacité de colonisation**

La manipulation des gènes associés à la signalisation des voies qui fonctionnent pendant la colonisation, telles que pour la motilité, le chimiotactisme et la formation de biofilms peut améliorer la colonisation des ABCM. Xu *et al.* (2019) ont construit une souche recombinante de *Bacillus velezensis* dans laquelle le gène *degQ* a été remplacé par un *degQ* inducible au xylose. Ils ont ensuite montré que la formation de biofilms par cette souche recombinante était induite en présence de xylose, qui est un hydrate de carbone typique sécrété par les racines des plantes. Cette souche a colonisé les racines de de tomate à des niveaux significativement plus élevés que la souche de type sauvage, et leur efficacité contre la fusariose vasculaire était également plus importante.

### **3.5. Amélioration de la tolérance au stress abiotique des agents de biocontrôle**

La tolérance au stress abiotique est une caractéristique nécessaire pour les microorganismes antagonistes utilisés comme agents de biocontrôle car ce stress peut avoir une influence négative sur la persistance et les performances des ABCM, De ce point de vue, l'amélioration de la tolérance au stress abiotique des ABCM contribuerait à assurer la performance souhaitée en matière de biocontrôle dans les conditions de champs. En général, deux stratégies ont été utilisées à cet égard. La première stratégie est le préconditionnement sous contrainte des ABCM, en les exposant à un stress sublétal (léger) pendant la culture de masse (Wang *et al.* 2018). Par exemple, Daranas *et al.*, (2018) ont signalé que le préconditionnement de *Lactobacillus plantarum* par incubation dans un bouillon hyperosmotique et acide améliorerait la tolérance à la dessiccation, dans un autre exemple, Puopolo *et al.*, (2015) ont démontré que la résistance aux UV est élevée chez les *Lysobacter capsici* cultivés à 15 °C par rapport à ceux cultivés à leur température de croissance optimale de 25 °C. La deuxième stratégie consiste à l'incorporation de protecteurs anti-stress dans les cellules des ABCM. La survie des microorganismes sous divers stress abiotiques est liés à l'accumulation intracellulaire de certains protecteurs (le tréhalose, le glucose et la glycine bêtaïne)(Potts 1994) ; les microorganismes peuvent absorber des niveaux élevés de protecteurs appliqués de manière exogène, qui s'accumulent dans le cytoplasme et améliorent la tolérance aux stress abiotiques (Streeter 2003).

## 4. Commercialisation des agents de biocontrôle :

La commercialisation des ABCM est un processus en plusieurs étapes qui implique l'isolement et le criblage des microorganismes antagonistes potentielles provenant d'écosystèmes naturels, le test de l'efficacité de l'isolat sur le terrain, la production de masse, la formulation, les études de toxicité, la livraison, la compatibilité, l'enregistrement et la libération (Junaid *et al.*, 2013).

Avant de développer une bio-formulation pour en faire un produit commercial, il faut connaître de manière approfondie plusieurs facteurs tels que les espèces phytopathogènes, le type d'hôtes qu'il attaque, l'épidémiologie de la maladie, la résistance des phytopathogènes et les conditions environnementales dans lesquelles l'ABCM sera utilisé (Carmona-Hernandez *et al.*, 2019). La bio-formulation consiste donc en un ingrédient actif, c'est-à-dire un organisme viable qui peut être un microorganisme/spore et un matériau porteur inerte qui soutient l'ingrédient actif/les cellules (Mishra et Naveen 2016). Elle se présente sous deux formes : des poudres sèches (solides) et des suspensions liquides (Ardakani *et al.*, 2009 ; Heydari *et al.*, 2010). Son degré de succès dépend de la cohérence de l'action à large spectre, de la demande économique et viable du marché, de la sécurité, de la stabilité, de la durée de conservation plus longue, des faibles coûts d'investissement et de la disponibilité aisée des matériaux de support. La sélection d'un matériau de support supérieur est une étape clé pour la survie et l'efficacité du PGPM car il est censé répondre aux conditions suivantes : la capacité de rétention d'eau élevée, l'absence de la production de chaleur en cas de mouillage, la stérilité, une nature chimiquement et physiquement uniforme, la biodégradabilité, et un pH presque neutre qui favorise la viabilité microbienne (Singh *et al.*, 2015). La valeur ajoutée de divers composés en tant qu'agents actifs pour améliorer la stabilité du produit, l'efficacité de l'application, la sécurité et la persistance sur le terrain est une autre étape importante pour le succès du produit et conduit à sa commercialisation.

Les essais en champ soigneusement conduits sur des plants de tomates inoculés avec des inoculants PGPM sont obligatoires pour une exploitation commerciale maximale de ces souches. Le succès des industries productrices d'inoculants microbiens, notamment celles qui utilisent des PGPR, dépendra de mesures comprenant la commercialisation des produits et des recherches approfondies. En outre, pour améliorer les processus de fermentation et de formulation, l'optimisation des souches sera nécessaire pour les introduire dans l'industrie agricole (Karthika *et al.*, 2020).

Citons comme exemples quelques formulations commerciales de PGPM qui ciblent différents pathogènes telluriques : Actinovate AG (*streptomyces lydicus* WYEC108) ; Intercept™ (*Pseudomonas capacia*) ; Bio-yield (*Bacillus subtilis* et *bacillus amyloliquefaciens*) ; Quantumr, Kodiakr et Epic (*bacillus subtilis*). (Tabassum *et al.*, 2017).

Ainsi que, Sanjibani, Guard, Niprot et Bioderma (*Trichoderma* spp.) (Kumar *et al.*, 2020).

#### **4.1. Processus de commercialisation :**

Selon Tabassum *et al.*, (2017) le processus de commercialisation se déroule comme suit

- :
1. L'enquête sur le terrain est un aspect important de la commercialisation. Les connaissances basées sur les propriétés des sols ou de la culture pour laquelle le PGPM est utilisé, les conditions climatiques de la région et l'adaptabilité des agriculteurs aux produits biologiques, sont primordiales pour que la formulation donne les résultats souhaités.
  2. L'isolement et le dépistage des souches locales de PGPM en laboratoire sont nécessaires car aucun inoculant microbien ne peut être universel pour tous les écosystèmes (Adesemoye *et al.*, 2009). En outre, dans le cadre du criblage, l'optimisation nutritionnelle est un aspect important et la meilleure souche est sélectionnée pour chaque propriété et la préférence est donnée aux souches ayant des propriétés multiples. Si des consortiums sont prévus, alors la compatibilité des souches doit également être analysée.
  3. La sélection du matériel et de la méthode de support nécessaires à l'inoculation doit être choisie en fonction de la viabilité du micro-organisme, de sa disponibilité pour les racines des plantes et de la faisabilité de son application. Les formulations liquides ne sont pas préférables pour la survie et la propagation du micro-organisme ; les matériaux de support solides sont plutôt considérés comme les meilleurs pour les applications sur le terrain. Le pH, la matière organique et le contenu nutritionnel sont pris en compte pour la sélection du support.
  4. Les microorganismes sélectionnés sont d'abord évalués en pots dans un environnement de contrôle, puis appliqués dans les champs des agriculteurs. Des essais approfondis sont réalisés avant la commercialisation du produit.

## **4.2. Les critères de choix d'un agent de biocontrôle commercialisé :**

Dans une formulation PGPM productive, les souches doivent présenter une capacité saprophytique compétitive élevée, une compétence rhizosphérique élevée en matière de rhizosphère, une multiplication de masse possible, un large spectre d'action, une amélioration de la croissance végétale, contrôle excellent et fiable, une compatibilité avec d'autres PGPM et une sécurité environnementale. En outre, les souches doivent tolérer les stress abiotiques tels que la chaleur, la dessiccation, le rayonnement UV et les agents oxydants (Nakkeeran *et al.*, 2005).

## **4.3. Facteurs qui limitent la commercialisation de la formulation des PGPM :**

### **4.3.1. Manque de preuves pratiques**

Les produits de PGPM manquent de preuves pratiques de leur efficacité instantanée, ce qui crée une incertitude quant à leurs performances (Moser *et al.*, 2008). Les coûts fixes élevés des biopesticides constituent un inconvénient pour les premiers utilisateurs, car le coût ne diminuera qu'une fois la technologie est utilisée plus largement, ce qui oblige les producteurs à recourir aux pesticides chimiques plutôt qu'à la nouvelle technique de protection des cultures, non testée, des biopesticides.

### **4.3.2. La spécificité des PGPM**

La spécificité du PGPM est indépendante de la colonisation des racines, certains d'entre eux présentent moins de spécificité, tandis que d'autres peuvent présenter une spécificité beaucoup plus large. Ainsi, l'application d'une combinaison souches utilisée sur une culture de canne à sucre comme PGPR peut ne pas être performante lorsqu'elle est appliquée sur une culture de coton car elle peut ne pas être compatible avec la culture sur laquelle elle est inoculée. Cela oblige les vendeurs commerciaux de PGPM à fournir des consortiums séparés pour les différentes cultures, ce qui rend difficile l'introduction de produits différents par les entreprises pour différentes cultures (Tabassum *et al.*, 2017). **4.3.3. La préférence pour la formulation du PGPR**

Bien que plusieurs souches de bactéries à Gram négatif (comme *Azospirillum*, *Pseudomonas*) soient des souches PGPR potentielles de biocontrôle efficaces, elles sont difficiles à formuler car elles ne produisent pas de spores. Ainsi, leur formulation a une courte durée de conservation, et les bactéries sont facilement tuées lors de la dessiccation (Kamilova *et al.*, 2015). D'une autre part, la plupart des formulations des PGPMs disponibles comprennent une seule souche microbienne qui peut ne pas être performante sur le terrain, toutefois si une plus grande diversité est préférable une meilleure relation avec la plante sera obtenue car certaines vont aider à supprimer la maladie et d'autres stimuleront sa croissance (Tabassum *et al.*, 2017).

#### **4.3.3. La survie et la stabilité des PGPR**

La formulation des bactéries Gram négatif (non sporulées) ayant une longue durée de conservation est une tâche assez problématique (Berg,2009). La commercialisation du PGPR peut être plus rapide avec des formulations à large spectre d'action ayant une performance constante et une durée de conservation accrue dans les conditions de terrain. En outre, les détails de la production et des formulations des produits de biocontrôle sont des secrets commerciaux qui entravent sérieusement les progrès scientifiques dans ces domaines, ce qui réduit par conséquent la promotion de ces produits. La compatibilité des consortiums microbiens dans les bio-formulations est également un problème car de nombreuses espèces microbiennes ne sont pas compatibles avec d'autres souches causant des problèmes pour la sélection (Nakkeeran *et al.*, 2005).

#### **4.3.4. Manipulation et ré-inoculation du PGPM**

Pour maintenir la charge microbienne et la robustesse en application sur le terrain, les microorganismes doivent avoir la capacité à être propagés et reproduits. Le transporteur doit avoir la capacité de faciliter l'autoreproduction de l'inoculant et de coloniser le plan cible à la livraison.

Une autre contrainte qui limite la commercialisation du PGPM est la mauvaise manipulation du produit par les producteurs, ce qui explique pourquoi les performances du PGPM dans les conditions de terrain ne sont pas très bonnes par rapport à celles dans des conditions contrôlées, ce qui rend la commercialisation de ces produits très difficile.

La performance d'une formulation au champ varie en fonction des conditions environnementales de la culture, ce qui rend difficile de prévoir la réaction des microorganismes par rapport à l'environnement contrôlé du laboratoire (Tabassum *et al.*, 2017).

## **Conclusion**

La production de la tomate est souvent limitée par des maladies, en particulier la maladie dévastatrice transmise par le sol, la fusariose vasculaire. Son diagnostic difficile, sa facilité de dissémination et sa persistance dans le sol constituent ainsi l'origine d'une importante perte

de production et de rendement. Elle est causée par le champignon spécifique à la tomate *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* ( *Fol* ) qui est un champignon filamenteux hémibiotrophe, et qui s'avère dangereux à cause de ses fortes potentialités de conservation dans le sol et de son caractère ubiquiste.

Durant les dernières années, la méthode la plus utilisée pour contrôler ces maladies est la fumigation du sol par des pesticides de synthèse comme le bromure de méthyle. Les différents éléments de ces substances ont, pourtant, des conséquences néfastes sur l'environnement, dont entre autres, l'accumulation des résidus entraînant la pollution des sols, l'apparition et la généralisation des mécanismes de résistance chez les pathogènes et le déséquilibre écologique dû au fait que beaucoup de ces composés de synthèse ont un large spectre d'action, détruisant non seulement les agents nuisibles, mais également les autres populations de l'écosystème. Au regard de ces inconvénients, l'utilisation ou l'exploitation de la microflore tellurique non pathogène en vue d'éliminer les ravageurs de cultures constitue une technologie émergente et écologiquement compatible tout en diminuant l'emploi de pesticides de synthèse.

Actuellement, plusieurs essais ont réussi à caractériser différentes souches d'agents antagonistes. Globalement, l'effet protecteur conféré par ces agents de lutte biologique est basé sur la compétition pour les nutriments essentiels et les sites d'infection, sur l'activité antagoniste vis-à-vis de la croissance des pathogènes via la production d'antibiotiques, d'enzymes, de composés organiques volatils, de sidérophores et/ou sur leur capacité à stimuler des systèmes de défense chez l'hôte végétal. Parmi les espèces les plus expérimentées et appliquées en tant qu'agent de biocontrôle on a les espèces appartenant au genre *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces* dans le groupe des PGPRs, et des PGPFs tels que des espèces du genre *Trichoderma* à savoir, *T. asperellum*, *T. harzianum* et *T. asperelloides*. Ainsi que des espèces de cyanobactéries et de bactéries lactiques. Ces agents biologiques ont fait preuve d'une inhibition significative de la maladie ainsi qu'une promotion de la croissance de la tomate.

Ces microorganismes peuvent inhiber efficacement le processus de contamination ainsi que la prolifération de *Fol*, soit en les appliquant en consortiums imitant ainsi la nature des sols suppressifs, en les améliorant génétiquement par l'augmentation de leur capacité à produire des antibiotiques, des enzymes hydrolytiques et des bactériocines ou en envahissant préalablement les graines à germer à travers la méthode de l'enrobage des graines.

Pour développer des mesures de biocontrôle stables et accélérer la commercialisation des ABCMs, des défis importants doivent être relevés notamment ; l'amélioration des performances, la facilité d'utilisation et le coût sur le terrain. Comme indiqué dans cette étude, ces défis peuvent certainement être surmontés par des méthodes de formulation et d'application des ABCMs basées sur les connaissances acquises sur la physiologie, le métabolisme et la génomique de ces microorganismes et sur les interactions plantemicroorganismes et microorganismes-microorganismes.

La future recherche dans la gestion de la fusariose vasculaire repose sur le développement d'approches moléculaires et biotechnologiques afin d'accroître notre connaissance de la maladie et de parvenir à gérer la progression du pathogène. De nouvelles alternatives devraient être explorées pour l'utilisation des bioinoculants, L'application d'un consortium bactérien multi-souches plutôt qu'une seule inoculation pourrait être une approche efficace, ainsi que de meilleurs tests de dépistage pour trouver la prochaine génération de ABCMs sont nécessaires pour mesurer l'effet global de l'interaction des différents modes d'actions de ces agents de biocontrôle en plein champs.

La commercialisation future des produits de bioinoculants et la libération de ces produits transgéniques dans l'environnement en tant qu'alternatives écologiques aux produits agrochimiques sans échec sont basés sur une compréhension approfondie des interactions entre les ABCMs et les microbiotes et dépendront de la production des données de biosécurité requises pour l'enregistrement de ces microorganismes. Une partie de ces recherches futures portera sur l'optimisation des conditions de croissance et l'augmentation de la durée de vie des produits PGPMs, non phytotoxiques pour les plantes cultivées, tolérant les conditions environnementales défavorables et un rendement plus élevé.

1. Aaronson, S., Dhawale, S.W and Patni, N.J. (1977). The cell content and secretion of water soluble vitamins by several fresh water algae. Arch Microbiol 112,57–59.
2. Abadie, C; Edel, V and Alabouvette, C. (1998). Soil suppressiveness to *fusarium* wilt: Influence of a cover-plant on density and diversity of *fusarium* populations. Soilbiol. Biochem-Vol.30, No.5, pp 634-649.
3. Abbas, HK; Duke, SO and Tanaka, T. (1993). Phytotoxicité des fumonisines et des composés apparentés. J. Toxicol. Toxin Rev.12: 225–251.

4. Abbasi, S., Safaie, N., Sadeghi, A and Shamsbakhsh, M. (2019). *Streptomyces* Strains Induce Resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* Race 3 in Tomato Through Different Molecular Mechanisms. *Frontiers in Microbiology*, 10.
5. Abdel-Aziz, M; Emam, T and Elsherbiny, A.E. (2020). Bioactivity of magnesium oxide nanoparticles synthesized from cell filtrate of endobacterium *Burkholderia rinojensis* against *Fusarium oxysporum*. *Materials Science and Engineering C*. 109. 110617.
6. Abdel-Kader, M. M., El-Mougy, N. S and Lashin, M. D. A. (2012). Different approaches of bio-control agents for controlling root rot incidence of some vegetables under greenhouse conditions. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 2(1), 115-127.
7. Abderrahmane, S; Merzoug, A and Taleb M. (2016). The use of non-pathogenic *Fusarium oxysporum* as a biocontrol against *Fusarium* wilt of date palm (Bayoud disease). In: *Proceedings of international workshop on "Sustainability of phoenici culture production systems in Algeria"* University of Biskra, p 67
8. Abuamsha, R., Salman, M and Ehlers, R. (2011). Effect of seed priming with *Serratia plymuthica* and *Pseudomonas chlororaphis* to control *Leptosphaeria maculans* in different oilseed rape cultivars. *Eur J Plant Pathol*. 130:287–95
9. Adesemoye, A.O., Torbert, H.A and Kloepper, J.W. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microb. Ecol*. 58, 921 – 929.
10. Aeron, A; Sandeep, K; Piyush, P and Maheshwari, DK. (2011). Emerging role of plant growth promoting rhizobacteria in agrobiolgy. In: *Bacteria in agrobiolgy: crop ecosystems*. Springer, Berlin, pp 1–36.
11. Agrios, GN. (2005). *Plant Pathology* 5. Edition Elsevier Academic Press, California. 922 p.
12. Ahmad, F., Ahmad, I and Khan, M.S. (2008). Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbial Research*, 163: 173-81.
13. Ahn, I., Kim, S and Lee, Y. (2005). Vitamin B1 functions as an activator of plant disease resistance. *Plant Physiol* 138, 1505–1515.
14. Alabouvette, C. (1986). *Fusarium*-wilt suppressive soils from the Châteaurenard region: review of a 10-year study. *Agronomie* 6,273-284.
15. Alabouvette, C. (1999). *Fusarium* wilt suppressive soils: an example of disease-suppressive soils. *Australas Plant Pathol* 28(1):57–64

16. Alabouvette, C., Aimè, S., Cordier, C and Olivain, C. (2008). « Comparative analysis of PR gene expression in tomato inoculated with virulent *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* and the biocontrol strain *F. oxysporum* Fo47
17. Alabouvette, C., Couteaudier, Y and Louvet, J. (1982). « Comparaison de la réceptivité de différents sols et substrats de culture aux fusarioses vasculaires », *Agronomie*, 2(11),1-6.
18. Alabouvette, C; Edel-Hermann, V; Lemanceau, P; Olivain, C; Recorbet, G and Steinberg, C. (2001). Diversity and interactions among strains of *Fusarium oxysporum*: application to biological control.
19. Al-Askar, A. A. And Rashad, Y. M. (2010). Arbuscular Mycorrhizal Fungi: A Biocontrol Agent Against Common Bean *Fusarium* Root Rot Disease. *Plant Pathol. J.* 9(1), 31–38.
20. Alexander, L.J and Tucker, C.M. (1945). Physiology specialisation in the tomato wilt fungus *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*. *J. Agr. Res.*70:303-313.
21. Alwathnani, HA and Perveen, K. (2012). Biological control of *Fusarium* wilt of tomato by antagonist fungi and cyanobacteria. *Afr J Biotechnol* 11:1100–1105
22. Alzandi, A.A and Naguib, D.M. (2019). *Pseudomonas fluorescens* metabolites as biopriming agent for systemic resistance induction in tomato against *Fusarium wilt*. *Rhizosphere*, 11, 100168.
23. Amin, M.; Jorfi, M.; Khosravi, A.D.; Samarbafzadeh, A.R; Farajzadeh and Sheikh, A. (2009). Isolation and Identification of *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus plantarum* from plants by PCR and detection of their antibacterial activity. *J. Biol. Sci.*9, 810–814
24. Anas, M.; Eddine, H.J and Mebrouk, K. (2008). Antimicrobial activity of *Lactobacillus* species isolated from Algerian raw goat's milk against *Staphylococcus aureus*. *World J. Dairy Food Sci.* 3, 39–49.
25. Anchisi, M., Gennari, M and Matta, A. (1985). Retardation of *fusarium* wilt symptoms in tomato by pre- and post –inoculation treatments of the roots and aerial parts of the host in hot water, *Physiological Plant Pathology*, 26, 175-183 , and Sclerotinum rolfsiiscanning electron microscopy and fluorescence microscopy. *Phytopathology* 73 : 85-88.
26. Anitha, D., Vijaya, T and Reddy, N.V. (2013). Microbial endophytes and their potential for improved bioremediation and biotransformation: a review. *Indo Am J Pharmaceutical Res* 3: 6408–6417.

27. Arbaoui, M.(1984). Essai d'utilisation de la vibration électrique et manuelle pour l'élimination de la fécondité de la tomate *Lycopersicum esculentum* non chauffée. Thèse d'ingénieur en agronomie, INA, Alger.56 p.
28. Ardakani, S., Heydari, A., Khorasani, N., Arjmandi, R and Ehteshami, M.(2009). Preparation of new biofungicides using antagonistic bacteria and mineral compounds for controlling cotton seedling damping-off disease. J. Plant Prot. Res. 49 (1), 49–56.
29. Askari, G.A.; Kahouadji, A.; Khedid, K.; Charof, R And Mennane, Z. (2012). Screening of lactic acid bacteria isolated from dried fruits and study of their antibacterial activity. Middle- East J. Sci. Res., 11, 209–215.
30. Atherton, J. (2005). Tomatoes.Ed. Ep Heuvmenardink Wageningen University, The Netherlands. USA, 29p.
31. Attia, S; El-Sayyad,G; Abd El-Kodous,M and el-batal, A. (2020). The effective antagonistic potential of plant growth-promoting rhizobacteria against *Alternaria solani* causing early blight disease in tomato plant. Scientia Horticulturae. 266.
32. Azcon-Aguilar, C. and Barea, J.M. (1996). Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens — an overview of the mechanisms involved. Mycorrhiza 6 : 457–464.
33. Baayen, R. P., van Drefven, F., Krijger, M. C and Waalwijk, C. (1997). Genetic diversity in *Fusarium oxysporum* f.sp. *dianthi* and *Fusarium redolens* f.sp. *dianthi*. Eur. J. Plant Pathol. 103:395-408.
34. Bahadur, I., Maurya, B.R., Meena, V.S., Saha, M., Kumar, A and Aeron, A. (2017). Mineral release dynamics of tricalcium phosphate and waste muscovite by mineralsolubilizing Rhizobacteria isolated from Indo-Gangetic Plain of India. Geomicrobiol. J. 34 (5), 454466.
35. Baker, BP, Green, TA et Loker, AJ .(2020). Lutte biologique et lutte intégrée contre les ravageurs dans les systèmes biologiques et conventionnels. Contrôle biologique 140, 104095..
36. Baker, K. F and Cook, R. J. (1974). Biological Control of Plant Pathogens. St. Paul, MN: The American Phytopathological Society. 433.
37. Baker, R and Chet, I. (1982). Induction of suppressiveness. In: Schneider RW (ed) Suppressive soils and plant diseases. American Phytopathological Society, St. Paul, MN, pp 35–50

38. Balasundram, N., Sundram, K and Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*.99:191–203.
39. Bao, J ; Fravel, D ; O'Neill, N ; Lazarovits, G and Berkum, P. (2002). Genetic analysis of pathogenic and non-pathogenic *Fusarium oxysporum* from tomato plants. *Canadian Journal of Botany*. 80.
40. Baracaldo, PS; Hayes, PK and Blank, CE. (2005). Morphological and habitat evolution in the cyanobacteria using a compartmentalization approach. *Geobiology* 3:145–165.
41. Bardin, S. D and Huang H. C. (2003). Efficacy of stickers for seeds treatment with organic matter or microbial agents for the control of damping-off of sugar beet. *Plant Path Bul.* 12:19–26.
42. Barna, B., Sarhan, A.R.T and Kiraly Z. (1985). The influence of nitrogen nutrition on the sensitivity of tomato plants to culture filtrates of *fusarium* and to fusaric acid *Physiological Plant Pathology*,23 : 257-263.
43. Bart, L; Petra, M. H and Martijn, R. (2009). Effector gene screening allows unambiguous identification of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* races and discrimination from other *formae speciales*, *FEMS Microbiology Letters*, Volume 300, Issue 2, Pages 201–215.
44. Beckers, G. J and Conrath, U. (2007). Priming for stress resistance: from the lab to the field. *Curr. Opin. Plant. Biol.* 10, 425–431.
45. Beckman, CH. (1988). *The Nature of Wilt Diseases of Plants*. St. Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society. APS Press.
46. Bénard, C. (2009). Etude de l'impact de la nutrition azotée et des conditions de culture sur le contenu en Polyphénols chez la tomate. Thèse de doctorat d'état en sciences agronomiques. Université de Nancy. P.18.
47. Benchabane, M ; Bakour, R ; Toua, D et Boutekrabt, A.. (2000). Mise en évidence de l'effet antagoniste de *Pseudomonas fluorescens* vis-à-vis de la fusariose vasculaire de la tomate. *Eppo Bulletin*. 30. 243-246.
48. Benhamou, N., le Floch, G., Vallance, J., Gerbore, J., Grizard, D., and Rey, P. (2012). *Pythium oligandrum*: an example of opportunistic success. *Microbiology*, 158(Pt 11), 2679-2694.
49. Bent, E. (2006). Induced systemic resistance mediated by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and fungi (PGPF). In: Tuzun S, Bent E (eds) *Multigenic and induced systemic resistance in plants*. Springer, New York, pp 225–258.

50. Berg, G. (2009). Plant–microbe interactions promoting plant growth and health: perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture. *Appl Microbiol Biotechnol* 84,11–18
51. Bergottini, V.M., Otegui, M.B., Sosa, D.A., Zapata, P.D., Mulot, M., Rebord, M., Zopfi, J., Wiss, F., Benrey, B and Junier, P.(2015). Bio-inoculation of yerba mate seedlings (*Ilex paraguariensis* St: Hill.) with native plant growth-promoting rhizobacteria: a sustainable alternative to improve crop yield. *Biol. Fert. Soils* 51 (6), 749–755.
52. Besford, R.T and Maw, G.A. (1975). Effect of potassium nutrition on tomato plant growth and fruit development. *Plant Soil*, 42 : 395-412
53. Bhagat, S ; Bambawale, O.M. ; Tripathi, A.K. ; Ahmad, I and Srivastava, R. (2013). Biological management of fusarial wilt of tomato by *Trichoderma spp.* in Andamans. *Indian Journal of Horticulture*. 70.397-403.
54. Bhatt, R ; Selvakumar, G ; Upreti, K.K and Boregowda, P. (2015). Effect of Biopriming with *Enterobacter* Strains on Seed Germination and Seedling Growth of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Under Osmotic Stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*.85.
55. Bhattacharyya, P.N and Jha, D.K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World J. Microbiol. Biotechnol.*28, 1327 -1350.
56. Bidellaoui, B ; Segarra, G ; Hakkou, A and Trillas, M.I. (2018). Beneficial effects of *Rhizophagus irregularis* and *Trichoderma asperellum* strain T34 on growth and *fusarium* wilt in tomato plants. *Journal of Plant Pathology*. 101.
57. Bilal, M; Guo, S; Iqbal, H.M.N; Hu, H ; Wang, W and Zhang, X.(2017). Engineering *Pseudomonas* for phenazine biosynthesis, regulation, and biotechnological applications: a review. *World J Microbiol Biotechnol* 33:191
58. Bitas, V; Kim, HS, Bennett, JW and Kang, S. (2013). Sniffing on microbes: diverse roles of microbial volatile organic compounds in plant health. *Mol Plant Microbe Interact* 26:835– 843
59. Blancard, D. (2009). Les maladies de la tomate, identifier, connaitre, maitriser. Edition : Quæ. Paris. 691-721p.
60. Bodah, E.T. (2017). Root rot diseases in plants: a review of common causal agents and management strategies. *Agri. Res. Tech.* 5 (3), 555661.
61. Bodker, L., Lewis, B. G and Coddington, A. (1994). The occurrence of a new genetic variant of *Fusarium oxysporum* f.sp. *pisi*. *Plant Pathol.* 42: 833-838

62. Booth, C. (1971). The genus *Fusarium*. Commonwealth Mycological Institute. Kew. Surrey, England., 237P.
63. Borguini, R and Torres, E. (2009). Tomatoes and Tomato Products as Dietary Sources of Antioxidants. *Food Reviews International - FOOD REV INT.* 25. 313-325.
64. Borowitzka, M.A.(1995). Microalgae as source of pharmaceuticals and other biologically active compounds. *J Appl Phycol* 7:3–15
65. Bosco, M.J., Bisen, K., Keswani, C and Singh, H.B., (2017). Biological management of *Fusarium* wilt of tomato using biofortified vermicompost. *Mycosphere* 8 (3), 1–16.
66. Bost, S. C. (2001). First report of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* race 3 on tomato in Tennessee. *Plant Dis.* 85:802.
67. Bouhot, D., Rouxel, F. et Louvet, J.(1972). Première observation de la fusariose vasculaire de la tomate en France. *Ann. Phytopathol.* 42 : 187-191 .
68. Bovey, R. (1972). La défense des plantes cultivées traité pratique de phytopathologie et de zoologie agricole. 6<sup>ème</sup> ed. Payot Lausanne.
69. Brundrett, M.C. (1991). Mycorrhizas in natural ecosystems. In: Macfayden A, Begon M, Fitter AH (eds) *Advances in ecological research*, vol 21. Academic, London, UK, pp 171– 313
70. Burnett, J.H. (1984). Aspects of *Fusarium* genetics. In “The Applied Mycology of *Fusarium*” (Moss M.O & Smith J.E., eds), pp. 39-69. Cambridge University Press, Cambridge.
71. Cai, G., Gale, L. R., Schneider, R. W., Kistler, H. C., Davis, R. M., Elias, K. S and Miyao, E. M. (2003). Origin of Race 3 of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* at a Single Site in California. *Phytopathology*, 93(8), 1014–1022.
72. Calero-Nieto, F; Di Pietro, A, Roncero, MIG and Hera, C. (2007). Role of the transcriptional activator XlnR of *Fusarium oxysporum* in regulation of xylanase genes and virulence. *Molecular Plant-Microbe Interactions.* 20(8):977-985
73. Campbell, R.(1989). The use of microbial inoculants in the biological control of plant diseases. in Campbell, R.M. Macdonald(eds.), *Microbial inoculation of Crop Plants.* Society for General Microbiology, OIRL Press, Oxford, UK.
74. Carmichael, W.W. (1992). *Cyanobacteria* secondary metabolites-the cyanotoxins. *J Appl Bacteriol* 72:445–459
75. Carmona-Hernandez, S ; Reyes-Pérez, J ; Chiquito-Contreras, R ; Rincon- Enriquez, G ; Cerdán, C.R. and Hernandez-Montiel, L.G.(2019). Biocontrol of Postharvest Fruit Fungal Diseases by Bacterial Antagonists: A Review. *Agronomy.* 9.

76. Caron, J ; Laverdière, L ; Thibodeau, P.O and Bélanger, R.R. (2012). Utilisation d'Une Souche Indigène de *Trichoderma Harzianum* Contre Cinq Agents Pathogènes Chez Le Concombre et La Tomate de Serre Au Québec. *Phytoprotection*, 83(2):73–87.
77. Chaudhary, V., Prasanna, R and Bhatnagar, A. K. (2012). Modulation of fungicidal potential of *Anabaena* strains by light and temperature. *Folia Microbiologica*, 57, 199–208.
78. Chaux, C., Foury, C. (1994). *Production Légumières Tome 1*. Editions Lavoisier., Tec et Doc, 126p.
79. Chellemi, D.O., Da,kers, H. A and Crosier, B. (1992). First report of *fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* race 3 on tomato in Northwest florida and Georgia. *Plant disease*, 76(8).
80. Chemeltorit, P. P., Mutaqin, K. H and Widodo, W. (2017). Combining *Trichoderma hamatum* THSW13 and *Pseudomonas aeruginosa* BJ10–86: A synergistic chili pepper seed treatment for *Phytophthora capsici* infested soil. *Eur. J. Plant Pathol.* 147:157-166
81. Chen, Y ; Zhou, D ; Qi, D ; Gao, Z ; Xie, J and Luo, Y. (2018). Growth Promotion and Disease Suppression Ability of a *Streptomyces* sp. CB-75 from Banana Rhizosphere Soil. *Frontiers in Microbiology*. 8. 2704.
82. Chen, Y; Wang, J and Yang, N. (2018). Wheat microbiome bacteria can reduce virulence of a plant pathogenic fungus by altering histone acetylation. *NAT COMMUN.* 9(3429).
83. Cirad. (2002). *Organisme, France Ministère des affaires étrangères, Cirad, centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement groupe de recherche et d'échanges technologique, ministère des affaires étrangère).* Mémento de l'agronomie. ed. Quae.p.1045-1046.
84. Cocozza,C and Ercolani,G.L. (1997). Siderophore production and associated characteristics in rhizosphere and non-rhizosphere fluorescent *pseudomonads*, *Annali di microbiol. enzimol.* 47 17–28.
85. Codd, G.A. (1995). Cyanobacterial toxins: occurrence, properties and biological significance. *Water Sci Technol*32(4) :149–156
86. Corbaz, R. (1990). *Principe de phytopathologie et de lutte contre les maladies des plantes.* Edition presse polytechnique et universitaire romande. Lausanne. 286 p.
87. Cordero, P; Principe, A; Jofre, E ; Mori, G and Fischer, S.(2014).Inhibition of the phytopathogenic fungus *Fusarium proliferatum* by volatile compounds produced by *Pseudomonas*. *ARCHMICROBIOL.*196(11):803-9.

88. Correll, J. C. Puhalla, J.E. and Schneider, R.W. (1987). Vegetative compatibility groups among nonpathogenic root-colonizing strains of *Fusarium oxysporum*. Canadian Journal of Botany 64, 2358-2361.
89. Dalié, D.K.D; Deschamps, A.M and Richard-Forget, F. (2010) .Lactic acid bacteria— potential for control of mould growth and mycotoxins: A review. Food Control, 21,370– 380.
90. Damam, M., Kaloori, K., Gaddam, B and Kausar, R. (2016). Plant growth promoting substances (phytohormones) produced by rhizobacterial strains isolated from the rhizosphere of medicinal plants. Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res. 37 (1), 130136.
91. Daranas, N ; Badosa, E ; Francés, J ; Montesinos, E and Bonaterra, A. (2018). Enhancing water stress tolerance improves fitness in biological control strains of *Lactobacillus plantarum* in plant environments. PLoS ONE 13:e0190931.
92. Davet, P. (1967). Les maladies des solanacées maraîchères en Tunisie. Annales I.N.R.A 40 (3): 1-13.
93. Davis, D. (1969). Fusaric acid in selective pathogenicity. Phytopathology 59: 1391- 1395.
94. Davis, R.M. (1988). A third race of *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* identified in California. Plant Dis. 66: 165-167.
95. De Boer, M., Born, P., Kindt, F., Keurentjes, J. J. B., van der Sluis, I., van Loon, L. C and Bakker, P. A. H. M. (2003). Control of *Fusarium* wilt of radish by combining *Pseudomonas putida* strains that have different disease-suppressive mechanisms. Phytopathology93:626-632
96. De Corato, U. (2020). Disease-suppressive compost enhances natural soil suppressiveness against soil-borne plant pathogens: A critical review. 13. 1-15.
97. Deacon, J.W; Berry, L.A. (1993). Biocontrol of soil-borne plant-pathogens— concepts and their application. Pestic Sci37:417–426
98. Deaker, R., Roughly, R. J and Kennedy, I. R. (2004). Legume seed inoculation technology—a review. Soil Biol Biochem. 36 :1275–88.
99. Degioanni,B. (1997). La tomate. Paris, Hatier. P96.
100. Digat, B. (1992). Controle biologique et stimulation de la germination par bactérisation phyto-défense des végétaux.441 :34-38.

101. Dmitri, V.M; Wulf,B and Linda, S.T. (2006). "Phenazine Compounds in *Fluorescent Pseudomonas* Spp. Biosynthesis and Regulation", *Phytopathology* Vol. 44: 417-445 p.
102. Doan, H; Maharaj, N; Kelly, K; Miyao, G; Davis, R and Leveau, J. (2019). Antimycotal activity of *Collimonas* isolates and synergy-based biocontrol of *Fusarium* wilt of tomato. *Phytobiomes Journal*. 4.
103. Dominguez, J ; Negrin, M.A and Rodriguez, C.M. (2001). Aggregate water-stability, particle size and soil solution properties in conducive and suppressive soils to *fusarium* wilt of banana from Canary islands (Spain). *Soil Biol Biochem* 33:449–455
104. Dossa, C., Pando-Bahuon, A., Renard, J. L and Boisson, C. (1991). Determination of vegetative compatibility groups in African *Fusarium oxysporum* strains isolated from vascular wilt-infected oil palms. *Oleagineux* 46:145-147
105. Duijff, B. J., Recorbet, G., Bakker, P. A. H. M., Loper, J. E and Lemanceau, P. (1999). Microbial antagonism at the root level is involved in the suppression of *Fusarium* wilt by the combination of nonpathogenic *Fusarium oxysporum* Fo47 and *Pseudomonas putida* WCS358. *Phytopathology* 89:1073-1079
106. Dumortie,r P., Evrad, M., Maiche, M., Nicolas, A., De Ridder, C et Costa Santos Baltazar, S. (2010). Biodiversité chez la tomate, stratégie de conservation et valorisation de collection « luc fichot ». Rapport final, Phytotechnie et horticulture. Gembloux agro bio tech., 105 p
107. El Zahar Haichar, F., Santaella, C., Heulin, T and Achouak, W. (2014). Root exudates mediated interactions belowground. *Soil Biol. Biochem.* 77, 69–80.
108. Elegba, M. S and Rennie, R. J. (1984). Effect of different inoculant adhesive agents on rhizobial survival, nodulation, and nitrogenase (acetylene-reducing) activity of soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill). *Can J Soil Sci.* 64:631–6.
109. Elmer, W. H and Stephens, C. T. (1989). Classification of *Fusarium oxysporum* f. sp. *asparagi* into vegetatively compatible groups. *Phytopathology* 79:88-93
110. El-Mougy, N and Abdel-Kader, M. (2008). Long-term activity of bio-priming seed treatment for biological control of faba bean root rot pathogens. *Australas Plant Pathol* 37:464–471.
111. Elshafie, H. S., Bufo, S. A, Racioppi, R and Camele, I. (2013). Biochemical characterization of volatile secondary metabolites produced by *Burkholderia gladioli* pv. *agaricicola*. *Int J Drug Discov* 5:181–184.
112. Fan, B., Blom, J., Klenk, H. P., & Borriss, R. (2017). *Bacillus amylobliquefaciens*,

- Bacillus velezensis*, and *Bacillus siamensis* Form an “Operational Group *B. amyloliquefaciens*” within the *B. subtilis* species complex. *Frontiers in Microbiology*.
113. Fernandez, D., Assigbetse, K., Dubois, M. P and Geiger, J. P. (1994). Molecular characterization of races and vegetative compatibility groups in *Fusarium oxysporum* f.sp. *vasinfectum*. *Appl. Environ. Microbiol.* 60 : 4039-4046
  114. Ferraz, H.G.M ; Resende, R.S ; Silveira, P.R ; Lage-Andrade, C.C ; Milagres, E.A and de A´vila- Rodriguez,F. (2014). Rhizobacteria induces resistance against *Fusarium* wilt of tomato by increasing the activity of defense enzymes. *Bragantia* 73:274–283.
  115. Fiely, M. B., Correll, J. C and Morelock, T. E. (1995). Vegetative compatibility, pathogenicity, and virulence diversity of *Fusarium oxysporum* recovered from spinach. *Plant Dis.* 79:990-993
  116. Filho, J. A. C., Pascholati, S. F and Sabrinho, R. R. (2016). Mycorrhizal Association and Their Role in Plant Disease Protection. *Plant, Soil and Microbes*, 95– 143.
  117. Fitrianiingsih, A. ; Martanto, E.A and Abbas, B. (2019). The effectiveness of fungi *Gliocladium fimbriatum* and *Trichoderma viride* to control *fusarium* wilt disease of tomatoes (*Lycopersicum esculentum*). *Indian Journal of Agricultural Research.* 53. 57-61.
  118. Flood, J., Whitehead, D. S., and Cooper, R. M. (1992). Vegetative compatibility and DNA polymorphisms in *Fusarium oxysporum* f.sp. *elaeidis* and their relationship to isolate virulence and origin. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 41:201-215
  119. Fravel, D; Olivain, C and Alabouvette, C. (2003). *Fusarium oxysporum* and its biocontrol. *New Phytol* 157:493–502.
  120. Gabe, H.L and Kright, B.C. (1973). The occurrence of a second race of the tomato *Fusarium* wilt in the greenhouse. *Brit. Insectic Fungic.* 3: 334.
  121. Gallais,A et Banneront, H. (1992). Amélioration des espèces végétales cultivée. Objectifs et critères de sélection. INRAEditions.
  122. Gamalero, E., A. Trotta, N. Massa, A. Copetta, M.G. Martinotti and G. Berta. (2004). Impact of two fluorescent *pseudomonads* and an arbuscular mycorrhizal fungus on tomato plant growth, root architecture and P acquisition. *Mycorrhiza* 14 : 185-192.

123. Gao, P., Li, Y., Guo, Y., and Duan, T. (2018). Co-inoculation of lucerne (*Medicago sativa*) with an AM fungus and a rhizobium reduces occurrence of spring black stem and leaf spot caused by *Phomamedicaginis*. *Crop Pasture Sci.* 69:933943.
124. García, R., Baelum, J., Fredslund, L., Santorum, P and Jacobsen, CS. (2010). Influence of Temperature and Predation on Survival of *Salmonella enterica* Serovar *Typhimurium* and Expression of *invA* in Soil and Manure-Amended Soil. *Applied and Environmental Microbiology.* 76. 5025-5031.
125. García-Salamanca, A., Molina-Henares, M.A., van Dillewijn, P., Solano, J., Pizarro-Tobías, P., Roca, A., Duque, E and Ramos, J.L. (2013). Bacterial diversity in the rhizosphere of maize and the surrounding carbonate-rich bulk soil. *Microb. Biotechnol.* 6 (1), 36–44.
126. Gerez, C.L and Torres, M.J.( 2013). Font de Valdez, G.; Rollán, G. Control of spoilage fungi by lactic acid bacteria. *Biol. Control*, 64, 231–237.
127. Ghazanfar, M., Hamid, M., Raza, M., Raza, W and Qamar, M. (2019). Suppressiveness of Late Blight and *Fusarium* Wilt of Tomato with *Trichoderma* Fortified Composts. *Sarhad Journal of Agriculture.* 35. 823-833. [10.17582/journal.sja/2019/35.3.823.833](https://doi.org/10.17582/journal.sja/2019/35.3.823.833).
128. Ghyselincx, J; Velivelli, S.L; Heylen, K, O’Herlihy E; Franco, J, Rojas, M ; Vos, P.D and Prestwich, B.D. (2013). Bioprospecting in potato fields in the Central Andean Highlands: screening of rhizobacteria for plant growth-promoting properties. *Syst Appl Microbiol* 36:116–127.
129. Giassi, V., Kiritani, C and Kupper, K.C.( 2016). Bacteria as growth-promoting agents for citrus rootstocks. *Microbiological Research* 190, 46-54.
130. Gillespie, D. R., and Menzies, j.G. (1993). Fungus gnats vector *Fusarium oxysporum* f. sp.*radicis-lycopersici*. *Ann. Appl. Bio.* 123: 539-544.
131. Gordon, T.R and Martyn, R.D.(1997). The evolutionary biology of *Fusarium oxysporum*. *Annu Rev Phytopathol* 35:111–128
132. Goswami, D; Janki, NT; Pinakin, C.D and Manuel, T.M. (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review. *Cogent Food Agric* 2(1):1–19.
133. Granchinho, S. C. R., Franz, C. M., Polishchuk, E., Cullen, W. R., Reimer, K. J. (2002). Transformation of arsenic (V) by the fungus *Fusarium oxysporum* f.sp. *melonis* isolated from the alga *Fucus gardneri*. *Appl. Organomet. Chem.* 16: 721-726.

134. Grattidge, R.. (1982). Occurrence of a Third Race of *Fusarium* Wilt of Tomatoes in Queensland. Plant Disease. 66. 165. 10.1094/PD-66-165.
135. Gravel, V. (2007). Lutte contre *Pythium ultimum* chez la tomate de serre : une approche microbienne. 138 p. Thèse (Ph. D), Faculté des Sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec.
136. Guignard, L. (2000) biochimie végétale. 274p.
137. Hamel, L. P; Nicole, M.C., Duplessis, S and Ellis, B.E. (2012). Mitogenactivated protein kinase signalling in plant-interacting fungi: Distinct messages from conserved messengers. Plant Cell Online. 24(4):1327-1351
138. Hariprasad, P., Divakara, S. T and Niranjana, S.R. (2011). Isolation and characterization of chitinolytic rhizobacteria for the management of *Fusarium* wilt in tomato. Crop Prot 30:1606–1612
139. Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I and Lorito, M. (2004). *Trichoderma* species — opportunistic, avirulent plant symbionts. Nat Rev Microbiol 2:43–56.
140. Harveson, R. M and Rush, C. M. (1997). Genetic variation among *Fusarium oxysporum* isolates from sugar beet as determined by vegetative compatibility. Plant Dis. 81:85-88
141. Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R and Ahmed, I. (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: A Review. Annals of Microbiology. 60. 579-598.
142. Henni, J.E. (1998). Morphologie, pouvoir pathogène et diversité génétique chez *Fusarium oxysporum* f.sp.lycopersici. Thèse de Doctorat d'état. Université d'Oran. 171p.
143. Heydari, A., Mohammed, P. (2010). A review on biological control of fungal plant pathogens using microbial antagonists. J. Biol. Sci. 10 (4), 273–290
144. Hoeper, H; Alabouvette, C. (1996). Importance of physical and chemical soil properties in the suppressiveness of soils to plant diseases. Eur J Soil Biol 32:41–58
145. Holtz, G. (1976). Race two of *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* in the Republic of South Africa. Phytophylactica 8: 87-88.
146. Howell, C.R. (2003). Mechanisms employed by *Trichoderma* species in the biological control of plant diseases: the history and evolution of current concepts. Plant Dis87:4–10

147. Huang, C.J., Tsay, J.F., Chang, S.-Y., Yang, H.P., Wu, W.-S and Chen, C.Y.(2012). Dimethyldisulfide is an induced systemic resistance elicitor produced by *Bacillus cereus* C1L. *Pest Manag. Sci.* 68 (9), 1306–1310.
148. Hubbard, J. C., and Gerik, J. S. (1993). A new wilt disease of lettuce incited by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucum* forma specialis nov. *Plant Dis.* 77:750-754.
149. Hubbeling, N and Dimond, A.E. (1972). Resistance to *Fusarium* and *Verticillium* wilt in tomato. *Melled. Ryksfac. landwet. Cenl.*190 p.
150. Husaini, A.M and Neri, D. (2016). Strawberry growth, development and diseases. 212p.
151. Hyakumachi, M. (1994). Plant-growth-promoting fungi from turf grass rhizosphere with potential for disease suppression. *Soil Microorg* 44:53–68
152. Inoue, I; Namiki, F and Tsuge, T. (2002). Plant colonization by the vascular wilt fungus *Fusarium oxysporum* requires FOW1, a gene encoding a mitochondrial protein. *Plant Cell Online.* 14(8) :1869-1883
153. Jaber ,L.R and Enkerli,J. (2017). Fungal entomopathogens as endophytes: can they promote plant growth, *Biocontrol Science and Technology*, 27:1, 28-41.
154. Jacobson, D.J and Gordon,T.R. (1990). Further investigations of vegetative compatibility within *Fusarium oxysporum* f.sp. *melonis*.*Can. J. Bot.* 68:1245-1248.
155. Jadhav, H.P; Shaikh, S.S and Sayyed, R.Z. (2017). Role of hydrolytic enzymes of rhizofora in biocontrol of fungal phytopathogens: an overview. In: *Rhizotrophs: plant growth promotion to bioremediation.* Springer, Singapore, pp 183–203.
156. Jain, A and Das, S. (2016). Insight into the interaction between plants and associated fluorescent *Pseudomonas spp.* *Int J Agron.*
157. Jaisingh, R., Kumar, A and Dhiman, M. (2016). Isolation and characterization of PGPR from rhizosphere of *Sesame indicum* L. *Int. J. Adv. Res. Biol. Sci.* 3, 238–244.
158. Jambhulkar,N. (2018). Assessing synergism of combined applications of *Trichoderma harzianum* and *Pseudomonas fluorescens* to control blast and bacterial leaf blight of rice. *Eur. J. Plant Pathol.* 152:747-757
159. Jambhulkar,P.P.,Sharma,M.,Lakshman, D and Sharma, P. (2015). Natural mechanisms of soil suppressiveness against diseases caused by *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Pythium*, and *phytophthora*. In: Meghvansi, M.K., Varma, A. Eds.,

- Organic Amendments and Soil Suppressiveness in Plant Disease Management 2015, vol. 46. Springer International Publishing Switzerland, pp. 95–124.
160. Jangir, M ; Sharma, S and Sharma, S. (2019). Target and non-target effects of dual inoculation of biocontrol agents against *Fusarium* wilt in *Solanum lycopersicum*.  
Biological Control. 138. 104069.
161. Jangir, M; Pathak, R; Sharma, S and Sharma, S. (2018). Biocontrol mechanisms of *Bacillus* sp., isolated from tomato rhizosphere, against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. Biol Control 123:60–70
162. Jeannequin, B., Dosba, F. et Amiot-carlin, M.J. (2005). Fruits et légumes caractéristiques et principaux enjeux. Collection « un point sur les filières ». INRA. Paris.
163. Jing, X ; Cui, Q ; Li, X ; Yin, J ; Ravichandran, V ; Pan, D ; Fu, J ; Tu, Q ; Wang H ; Bian, X and Zhang, Y. (2018). Engineering *Pseudomonas protegens* Pf-5 to improve its antifungal activity and nitrogen fixation. Microb Biotechnol.
164. Jogaiah, S., Abdelrahman, M., Tran, L.S. P and Ito, S.I. (2017). Different mechanisms of *Trichoderma virens* -mediated resistance in tomato against *Fusarium* wilt involve the jasmonic and salicylic acid pathways. Molecular Plant Pathology, 19(4), 870– 882.
165. Jones, DL; Hodge, A and Kuzyakov, Y. (2004). Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. The New Phytologist. 163(3) :459-480
166. Jones, JB; Jones, J.P; Stall, R.E and Zitter, T.A. (1991). Compendium of tomato diseases. APS Press, St. Paul
167. Joshi, M., Srivastava, R., Sharma, A. and Prakash, A. (2013). Isolation and characterization of *Fusarium oxysporum*, a wilt causing fungus, for its pathogenic and non-pathogenic nature in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Applied and Natural Science*, 5(1), 108-117.
168. Joshi, R. (2018). A review of *Fusarium oxysporum* on its plant interaction and industrial use. J. Med. Plants Stud. 6 (3), 112-115.
169. Junaid, J.M. ; Dar, N.A. ; Bhat, T.A. ; Bhat, A and Bhat, A. (2013). Commercial Biocontrol Agents and Their Mechanism of Action in the Management of Plant Pathogens. Int J Modern Plant & Anim Sci. 1. 39-57.

170. Jung, S ; Martínez-Medina, A ; López-Ráez, J and Pozo, M. (2012). Mycorrhiza-Induced Resistance and Priming of Plant Defenses. *Journal of chemical ecology*. 38. 651-64.
171. Junges, E ; Santos, R ; Finger, G; Muniz, M and Toebe, M. (2013). Effect of priming and seed-coating when associated with *Bacillus subtilis* in maize seeds. *Revista Ciencia Agronomica*. 44. 520-526.
172. Kamal, R ; Gusain, Dr Y ; Kumar, V. (2014). "Interaction and symbiosis of AM fungi, *actinomyces* and plant growth promoting rhizobacteria with plants: Strategies for the improvement of plants health and defense system". *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 3.564-585.
173. Kamilova, F., Okon, Y., de Weert, S and Hora, K.(2015). Commercialization of microbes: manufacturing, inoculation, best practice for objective field testing, and registration. In: Lugtenberg, B. (Ed.), *Principles of Plant-Microbeinteractions*. Springer International, pp. 319–327
174. Kang, S.M., Radhakrishnan, R., You, Y.H., Khan, A.L., Park, J.M., Lee, S.M and Lee, I.J. (2015). Cucumber performance is improved by inoculation with plant growth promoting microorganisms. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section Bdsoil & Plant Science* 65 (1), 36-44.
175. Kariuki, G.M and Dickson,D.W. (2007). Transfer and Development of *Pasteuria penetrans*. *J Nematol* 39(1):55
176. Karthik, C., Oves, M., Thangabalu, R., Sharma, R., Santhosh, S.B and Arulselvi, P.I.(2016). *Cellulosimicrobium funkei*-like enhances the growth of *Phaseolus vulgaris* by modulating oxidative damage under Chromium (VI) toxicity. *J adv Res.* 7, 839–850.
177. Karthika, S ;Varghese, S and Shanavas, J. (2020). Exploring the efficacy of antagonistic rhizobacteria as native biocontrol agents against tomato plant diseases. *3 Biotech*.
178. Katan, T. (1996). Vegetative-compatibility groups in populations of *Fusarium oxysporum* in Israel. (Abstr.) *Phytoparasitica* 24:139.
179. Katan, T., Katan, J., Gordon, T. R., and Pozniak, D. (1994). Physiologic races and vegetative compatibility groups of *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis* in Israel. *Phytopathology* 84:153-157

180. Katan, T., Zamir, D., Sarfatti, M and Katan, J. (1991). Vegetative compatibility groups and subgroups in *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*. *Phytopathology* 81 :255-262.
181. Kaur, R; Kaur, J and Rama,S.S. (2010).Non pathogenic *Fusarium* as a biological control agent. *Plant Pathol J* 9:79–91
182. Kaur, R; Neelam, J; Virk, J.S and Sudhendu, S. (2016). Evaluation of *Pseudomonas fluorescens* for the management of tomato early blight disease and fruit borer. *J Environ Biol* 37:869– 72
183. Kawabe, M ; Mizutani, K ; Yoshida, T; Teraoka, T ; Yoneyama, K ; Yamaguchi, I and Arie, T. (2004). Cloning of the pathogenicity- related gene FPD1 in *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Journal of General Plant Pathology*. 70. 16-20.
184. Khalid, M; Shameel, M; Ahmed, V; Shahzad, S and Lghani, S. (2010). Studies on the bioactivity and Phycochemistry of *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyta) from Sindh. *Pak J Bot* 42 (4):2635–2646
185. Khalil, M.A and Shimaa, H.F.A. (2020). Use of biological control and biofertilization against *Fusarium* wilt disease and its effect on growth characteristics and tomato productivity. *Current Research in Environmental & Applied Mycology (Journal of Fungal Biology)* 10(1), 71–84.
186. Khan, M.I.R., Syeed, S., Nazar, R. and Anjum, N.A. (2012). An insight into the role of salicylic acid and jasmonic acid in salt stress tolerance. In *Phytohormones and Abiotic Stress Tolerance in Plants* eds Khan, N.A., Nazar, R., Iqbal, N. and Anjum, N.A. pp. 277– 300. Berlin, Heidelberg: Springer.
187. Khan, N., Bano, A. (2016). Modulation of phytoremediation and plant growth by the treatment with PGPR, Ag nanoparticle and untreated municipal wastewater. *Int. J. Phytoremediation* 18 (12), 1258–1269.
188. Kim, J and Kim, J.D. (2008). Inhibitory effect of algal extracts on mycelial growth of the tomato- wilt pathogen, *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Mycobiology* 36:242–248.
189. Kim, J. D. (2006). Screening of *cyanobacteria* (blue-green algae) from rice paddy soil for antifungal activity against plant pathogenic fungi. *Mycobiology* 34:138142.
190. Kistler,H.C. (1997). Genetic diversity in the plant-pathogenic fungus *Fusarium oxysporum*.*Phytopathology* 87: 474–479.

191. Kistler, H.C; Benny, U; Boehm, E.W.A and Katan, T. (1995). Genetic duplication in *Fusarium oxysporum*. *Curr Genet* 28:173–176
192. Kloepper, J.W. (1994). Plant growth-promoting rhizobacteria (other systems) Y. Okon, Ed. *Azospirillum/Plant Associations*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp.111118
193. Köhl, J. Kolnaar, R and Ravensberg, W.J. (2019). Mode of Action of Microbial Biological Control Agents Against Plant Diseases: Relevance Beyond Efficacy. *Front. Plant Sci.* 10:845
194. Kokalis-Burelle, N., Kloepper, J.W and Reddy, M.S.(2005). Plant growthpromoting rhizobacteria as transplant amendments and their effects on indigenous rhizosphere microorganisms. *Appl. Soil Ecol.* 31, 91–100.
195. Kolev, N. (1976). Les cultures maraichères en Algérie. Tome I. Légumes fruits. Ed. Ministre de l'Agriculture et des Reformes Agricoles. 52p.
196. Komi, A. (1993). Pouvoir pathogène et diversité génétique chez *Fusarium oxysporum* f.sp.vasinfectum (ATK) SN. Et H : Agent de la fusariose du cotonnier. Thèse de doctorat d'état. Université de Montpellier II. Sciences et Techniques du Languedoc.
197. Kommedahl, T., Abbas, H.K., Burnes, P.M and Mirocha, C.J. (1988). Prevalence and toxigenicity of *Fusarium* species from soils of Norway near the Arctic Circle. *Mycologia.* 80:790–794.
198. Konappa, N.M., Maria, M., Uzma, F., Krishnamurthy, S., Nayaka, S.C., Niranjana, S.R and Chowdappa, S. (2016). Lactic acid bacteria mediated induction of defense enzymes to enhance the resistance in tomato against *Ralstonia solanacearum* causing bacterial wilt. *Scientia Horticulturae* 207, 183-192
199. Kong, W.L ; Li, P.S ; Wu, X.Q ; Wu, T.Y and Sun, X.R. (2020). Diffusible and Volatile Antifungal Compounds Produced by *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* ST-TJ4 against Various Phytopathogenic Fungi.
200. Koptera, Z.P. (1970). Biosynthesis of thiamine, riboflavin and vitamin B12 by some blue- green algae. *Mikrobiol Zh (Kiev)* 32, 429–433
201. Korpi, A; Jarnberg, J and Pasanen, A.L. (2009). Microbial volatile organic compounds. *Crit Rev Toxicol* 39:139–193
202. Kraemer, S. (2004). Iron Oxide Dissolution and Solubility in the Presence of Siderophores. *Aquatic Sciences.* 66. 3-18. 10.1007/s00027-003-0690-5.

203. Kumar, G; Teli, B; Mukherjee, A ; Bajpai, R and Sarma, B. (2019). Secondary Metabolites from Cyanobacteria: A Potential Source for Plant Growth Promotion and Disease Management. 10.
204. Kumar, U ; Kumar, S.S ; Kumar, P ; Kumar, A and Kumar, A. A. (2020). Research article on *Trichoderma spp*: An effective biocontrol agent for management of plant diseases and enhance the sustainability. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 9(3): 1087- 1090.
205. L,Hersman; Lloyd,T and Sposito,G . (1995). Siderophore-promoted dissolution of hematite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 59 3327–3330.
206. Lachisa, L and Dabassa, A. (2016). Synergetic effect of rhizosphere bacteria isolates and composted manure on *fusarium* wilt disease of tomato plants. Res J Microbiol 11(1):20–27
207. Lamont, J.R ; Wilkins, O ; Bywater-Ekegård, M and Smith, D.L. (2017). From yogurt to yield: Potential applications of lactic acid bacteria in plant production. Soil Biol. Biochem. 111, 1– 9.
208. Larkin, R. P., Hopkins, D. L., and Martin, F. N. (1990). Vegetative compatibility within *Fusarium oxysporum* f.sp. *niveum* and its relationship to virulence, aggressiveness, and race. Can. J. Microbiol. 36:352-358.
209. Larkin, R.P and Fravel, D.R. (1999). Mechanisms of action and dose response relationships governing biological control of *Fusarium* wilt of tomato by non pathogenic *Fusarium* spp. Phytopathology 89:1152–1161
210. Latigui, A. (1984). Effets des différents niveaux de fertilisation potassique sur la fructification de la tomate cultivée en hiver sous serre non chauffée. Thèse Magister.

#### INA El-Harrach.

211. Laumonier, R. (1979). Culture légumières et maraichère. Tome III. Ed. Baillier, Paris: 279p. Leong J. (1986). Siderophores: their biochemistry and possible role in biocontrol of plant pathogen. Annu Rev Phytopathol 24:187–209
212. Lavermicocca, P., Valerio, F., Evidente, A., Lazzaroni, S., Corsetti, A., and Gobetti, M.( 2000). Appl. Environ. Micro biol., , vol. 66, pp. 4084–4090.
213. Lawn,D ; Valenzuela-Ureta,J.G ; Lawn,D.A; Heisey,R.F and Zamudio-Guzman,V. (1996). Plant Disease 80:105. First Report of *Fusarium* Wilt Race 3, Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, of Tomato in Mexico..Plant Disease. 80:105.

214. Lemanceau, P.(1992). Effets bénéfiques de rhizobactéries sur les plantes : Exemple des *Pseudomonas spp.* Fluorescents .Agronomie 12 : 413-437.
215. Lemanceau,P.(1988). Réceptivité des sols au fusarioses vasculaires : Etude critique des théories proposées.pdr thesis.University of Lyon,Lyon.
216. Li, M; Ahammed, G.J ; Li, C ; Bao, X ; Yu, J ; Huang, C ; Yin, Ha and Zhou, J. (2016). Brassinosteroid Ameliorates Zinc Oxide Nanoparticles-Induced Oxidative Stress by Improving Antioxidant Potential and Redox Homeostasis in Tomato Seedling. *Frontiers in Plant Science*. 7.
217. Li, N., Alfiky, A. L., Wang, W., Islam, M. d., Nourollahi, K., Liu, X and Kang, S. (2018). Volatile Compound-Mediated Recognition and Inhibition Between *Trichoderma* Biocontrol Agents and *Fusarium oxysporum*. *Frontiers in Microbiology*. 9.
218. Li, Y.T ; Hwang, S.G ; Huang, Y.M and Huang, C.H. (2018). Effects of *Trichoderma asperellum* on nutrient uptake and *Fusarium* wilt of tomato. *Crop Protection*. 110.
219. Lievens, B; Rep, M and Thomma, B.P.H.J. (2008). Recent developments in the molecular discrimination of formae speciales of *Fusarium oxysporum*. *Pest Manag Sci* 64: 781–788
220. Liu, D., Lian, B and Dong, H., (2012). Isolation of *Paenibacillus sp.* and assessment of its potential for enhancing mineral weathering. *Geomicrobiol. J.* 29 (5), 413-421
221. Liu, J; Maldonado-Mendoza, I; Lopez-Meyer, M; Cheung, F; Town, C.D and Harrison, M.J. (2007). Arbuscular mycorrhizal symbiosis is accompanied by local and systemic alterations in gene expression and an increase in disease resistance in the shoots. *Plant J*50:529–544.
222. Liu, K., McInroy, J. A., Hu, C.-H., and Kloepper, J. W. (2018). Mixtures of plantgrowth- promoting rhizobacteria enhance biological control of multiple plant diseases and plant- growth promotion in the presence of pathogens. *Plant Dis.* 102:67-72.
223. Loffler, H. J. M., and Rumine, P. (1991). Virulence and vegetative compatibility of Dutch and Italian isolates of *Fusarium oxysporum* f.sp. *lilii*. *J. Phytopathol.* 132:1220

224. Lopez-Seijas, J ; García-Fraga ; Silva, d and Sieiro, C. (2019). Wine Lactic Acid Bacteria with Antimicrobial Activity as Potential Biocontrol Agents against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*.
225. Louvet, J ; Rouxel, F and Alabouvette, C. (1976). Recherches sur la résistance des sols aux maladies. I – Mise en évidence de la nature microbiologique de la résistance d'un sol au développement de la fusariose vasculaire du melon. *Annales de Phytopathologie* 8: 425– 436
226. Lynch, J.M. (1985). Origin, nature and biological activity of aliphatic substances and growth hormones found in soil. In: Vaughan, D., Malcolm, R.E.Eds. *Soil Organic Matter and Biological Activity*. Springer, Netherlands, pp.151-174
227. Ma, Y., Rajkumar, M., Zhang, C., Freitas, H. (2016). Beneficial role of bacterial endophytes in heavy metal phytoremediation. *J. Environ. Manage.* 174,14-25.
228. Mabood, F., Xiaomin, Z and Donald, L.S .(2014). Microbial signaling and plant growth promotion. *Can J Plant Sci* 94:1051–1063.
229. Mahanty, M., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, M., Das, B., Ghosh, A. and Tribedi, P. (2017). Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science and Pollution Research* 4: 3315–3335
230. Mahmood, A and Kataoka, R. (2018). Potential of Biopriming in Enhancing Crop Productivity and Stress Tolerance.
231. Majewska, M., Rola, K and Zubek, S. (2017). The growth and phosphorus acquisition of invasive plants *Rudbeckia laciniata* and *Solidago gigantea* are enhanced by arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*. 27.
232. Maksimov, I. V., Abizgil'dina, R. R and Pusenkova, L. (2011). Plant growth promoting microorganisms as alternative to chemical protection from pathogens (review). *Prikl Biokhim Mikrobiol* 47(4):373– 85.
233. Mandeel, Q.A., Abbas, J.A and Saeed, A.M. (1995). Survey of *Fusarium* species in an arid environment of Bahrain: II. Spectrum of species on five isolation media. *Sydowia* 47 :223- 239.
234. Mangalanayaki, R., Durga, R and Sengamala, T .(2016). Antagonistic effect of *Bacillus* species in biocontrol of plant pathogen *Fusarium*. *World J Pharm Pharm Sci* 5(6):956–966.

235. Marian, M. (2019). Improving performance of microbial biocontrol agents against plant diseases. *Journal of General Plant Pathology*.
236. Marian, M., Morita, A., Koyama, H., Suga, H., and Shimizu, M. (2019). Enhanced biocontrol of tomato bacterial wilt using the combined application of *Mitsuaria* sp. TWR114 and non pathogenic *Ralstonia* sp. TCR112. *J. Gen. Plant Pathol.*85:142-154
237. Marlatt, M. L., Correll, J. C., Kaufmann, P., and Cooper, P. E. (1996). Two genetically distinct populations of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* race 3 in the United States. *Plant Dis.* 80:1336-1342.
238. Marois, J. J. (1990). Biological control of diseases caused by *Fusarium oxysporum*. In: Ploetz RC (ed) *Fusarium* wilt of banana. APS Press, St Paul, pp77–
- 81.
239. Martínez-Rocha, A, Roncero, M. I., López-Ramirez, A., Mariné, M., Guarro, J., Martínez-Cadena, G and Pietro, A. (2008). Rho1 has distinct functions in morphogenesis, cell wall biosynthesis and virulence of *Fusarium oxysporum*. *Cellular microbiology.* 10.1339-51.
240. Mattar, J. (1993). Les *Pseudomonas* fluorescents de la rhizosphère : caractérisation, incidence de la température et microflore autochtone sur la colonisation racinaire. Thèse. Doct. Univ. Lyon 130p.
241. Maw, G.A and Kempton, R.J.(1973). MethylBromide as soil fumigant soil fertility.36 : 41-47.
242. McGovern, R. (2015). Management of tomato diseases caused by *Fusarium oxysporum*. *Crop Protection.* 73.
243. Meena, R.K., Singh, R.K., Singh, N.P., Meena, S.K and Meena, V.S. (2015). Isolation of low temperature surviving plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) from pea (*Pisum sativum* L) and documentation of their plant growth promoting traits.*Biocatal.Agri.Biotech.*4,806-811.
244. Meena, V.S., Maurya, B.R and Verma, J.P. (2014). Does a rhizospheric microorganism enhance K1 availability in agricultural soils. *Microbiol. Res.* 169 (5), 337347.
245. Mehta, C., Palni, U., Franke-Whittle, I and Sharma, A. (2014). Compost: its role, mechanism and impact on reducing soil-borne plant diseases. *Waste Manag.* 34 (3), 607–622.

246. Merrill, A. H., Sullards, M. C, Wang, E., Voss K. A and Riley, R. T. (2001). Sphingolipid métabolisme: Rôles dans la transduction du signal et la perturbation par les fumonisines. Environ. Point de vue de la santé. 109 :283-289.
247. Mes, J.J., Van Doom, J., Rohoeck, B. A, Van Egmond, E., Van Aartrijk, J and Boonekamp, P. M. (1994). Restriction fragment length polymorphisms, races and vegetative compatibility groups within a worldwide collection of *Fusarium oxysporum* f, sp. *gladioli*. Plant Pathol43: 362-370
248. Messiaen, C.M et Lafon, R. (1970). Les maladies des plantes maraichères. Edition INRA. Paris. 431p.
249. Messiaen, C.M. (1981). Les variétés résistantes. Méthodes de lutte contre les maladies et ennemies des plantes. Edition INRA, Paris. 374p.
250. Michelina, R., Massimo, G., Oscar, A., Bernard, J. K and Philippe, N. (2011). Lutte biologique N°2 : tomate. Food quality and safety 6TH FRAMEWORK PROGRAMME,p5.
251. Mikanowski, L et Mikanowski, P. (1999). Tomate. Paris, edition du chêneHachette. p192.
252. Mishra, J. and Arora, N.K. (2018). Secondary metabolites of *fluorescent pseudomonads* in biocontrol of phytopathogens for sustainable agriculture. Appl Soil Ecol 125, 35-45.
253. Mishra, S., Singh, A., Keswani, C., Saxena, A., Sarma, B.K and Singh, H.B. (2015). Harnessing plant-microbe interactions for enhanced protection against phytopathogens. Plant Microbes Symbiosis: Applied Facets. Springer, pp. 111–125.
254. Mj, B; Bisen, K. K and Singh, H. (2017). Biological management of *Fusarium* wilt of tomato using biofortified vermicompost. Mycosphere 8(3):467–483.
255. Mohite, B. (2013). Isolation and characterization of indole acetic acid (IAA) producing bacteria from rhizospheric soil and its effect on plant growth. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 13 (3), 638-649.
256. Morandi, D. (1996). Occurrence of phytoalexins and phenolic compounds in endomycorrhizal interactions and their potential role in biological control. Plant Soil 185:241–251

257. Morath, S. U, Hung, R and Bennett, J.W. (2012). Fungal volatile organic compounds: a review with emphasis on their biotechnological potential. *Fungal Biol Rev* 26:73–83
258. Moser, R., Pertot, I., Elad, Y and Raffaelli, R. (2008). Farmers' attitudes toward the use of biocontrol agents in IPM strawberry production in three countries. *Biol. Control* 47 (2), 125–132.
259. Munro, D. B et Small, E. (1998). *Les legumes du Canada*. NRC Research Press.
260. Nahid, H and Sareh, B. R. (2015). Application of *Bacillus pumilus* as a potential biocontrol agent of *Fusarium* wilt of tomato, *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 48:13-16, 841-849.
261. Naing, K. W., Anees, M., Kim, S. J., Nam, Y., Kim, Y. C and Kim, K. Y. (2014). Characterization of antifungal activity of *Paenibacillus ehimensis* KWN38 against soilborne phytopathogenic fungi belonging to various taxonomic groups. *Ann Microbiol* 64:55–63
262. Nakkeeran, S., Fernando, W. D and Siddiqui, Z. A. (2005). Plant growth promoting rhizobacteria formulations and its scope in commercialization for the management of pests and diseases. In: *PGPR: biocontrol and biofertilization*. Springer, Dordrecht, pp257–296
263. Nath, D., Maurya, B.R and Meena, V.S. (2017). Documentation of five potassium-and phosphorus-solubilizing bacteria for their K and P-solubilization ability from various minerals. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 10, 174-181.
264. Nelson, P. E., Toussoun, T. A and Cook, R. K. J. (1981). "*Fusarium*". *Diseases, Biology and Taxonomy*. Penn. Star. Univ Press, 457p.
265. Nguyen, D.T., Hieu, N.C., Hung, N.V., Thao, H.T.B., Keswani, C., Toan, P.V and Hoat, T.X. (2019). Biological control of *fusarium* root rot of Indian mulberry (*Morinda officinalis* How.) with consortia of agriculturally important microorganisms in Vietnam. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 6, 27.
266. Nikhat, S., Siddique, V.H., Pakkala, A., Yasha, K., Ankit, K., Akshay, K and Singadi, S. R. (2019). Biological control of *fusarium* wilt of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) by antagonistic fungi. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2019; 8(4): 2252-2259.
267. Nogales-Moncada, A. M., Pérez-Artés, E., and Jiménez-Díaz, R. M. (1993). VCG diversity within *Fusarium oxysporum* f.sp. *ciceris*. (Abstr.) Page 169 in: *Abstr. Int.*

Congr. Plant Pathol., 6th. National Research Council Canada, Ottawa.

268. Norman, J.R and Hooker, J.E. (2000). Sporulation of *Phytophthora fragariae* shows greater stimulation by exudates of non-mycorrhizal than by mycorrhizal strawberry roots. *Mycologia* 104:1069-1073.
269. Oliveira, M. F., Da Silva, M. G., Van der Sand, S. T. (2010). Antiphytopathogen potential of endophytic actinobacteria isolated from tomato plants (*Lycopersicon esculentum*) in southern Brazil, and characterization of *Streptomyces* sp. R18 (6), a potential biocontrol agent. *Res Microbiol* 161:565–572.
270. Oliver, C., Hernández, I., Caminal, M., Lara, J and Fernandez, C. (2019). *Pseudomonas putida* strain B2017 produced as technical grade active ingredient controls fungal and bacterial crop diseases. *Biocontrol Science and Technology*. 10.1080/09583157.2019.1645304.

271. Ongena, M and Thonart, P. (2006). Resistance induced in plants by nonpathogenic microorganisms: elicitation and defense responses. In: Floriculture, ornamental and plant biotechnology: advances and topical issues. 1st ed. Japan: Global Science Books, 447- 463.
272. Ongena, M., Jacques, P., Delfosse, P. and Thonart, P. (2002). Unusual traits of the pyoverdinin-mediated iron acquisition system in *Pseudomonas putida* strain BTP1. *Biometals*. 15(1) :1-13.
273. Ozenda, P. (1990). Les organismes végétaux, tome 1 : Végétaux inférieurs. Masson. 220p
274. Pal KK, Gardener M. (2006). Biological control of plant pathogens. *Plant Health Instr* 2:1117–1142
275. Panebianco, S., Vitale, A., Polizzi, G., Scala, F., and Cirvilleri, G. (2015). Enhanced control of postharvest citrus fruit decay by means of the combined use of compatible biocontrol agents. *Biol. Control* 84:19-27.
276. Paramanandham, P., Rajkumari, J., Pattnaik, S and Busi, S. (2017). Biocontrol Potential Against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* and *Alternaria solani* and Tomato Plant Growth Due to Plant Growth–Promoting Rhizobacteria. *International Journal of Vegetable Science*. 10.1080/19315260.2016.1271850.
277. Patel, P.R., Shaikh, S.S., Sayyed, R.Z.(2016). Dynamism of PGPR in bioremediation and plant growth promotion in heavy metal contaminated soil. *Indian J. Exp. Biol.* 54, 286–290.
278. Patil, H., Srivastava, A., Singh, D. P., Chaudhari, B and Arora, D. (2011). Actinomycetes mediated biochemical responses in tomato (*Solanum lycopersicum*) enhances bioprotection against *Rhizoctonia solani*. *Crop Protection*. doi: 10.1016/j.cropro.2011.04.008.10.1016/j.cropro.2011.04.008.
279. Patil, S. (2018). Evaluation of non-pathogenic *Fusarium* for antagonistic activity against *Fusarium* wilt of tomato.
280. Paulitz, T.C. and R.G. Linderman. (1991). Lack of antagonism between the biocontrol agent *Gliocladium virens* and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytol.* 117 : 303-308.
281. Pecault, P., Laterrot, H. (1966). Perspective sur la sélection de variétés de tomate résistantes aux maladies. *Genetica Agaria* 20: 110-120.

282. Periago M. J., García-Alonso J., Jacob K., Olivares A. B., Bernal A. J and Iniesta M. D. (2009). Bioactive compounds, folates and antioxidant properties of tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) during vine ripening. *International Journal of Food Science and Nutrition*. 60(8):694–708.
283. Pichersky, E., Noel, J and Dudareva, N. (2006). Biosynthesis of plant volatiles: nature's diversity and ingenuity. *Science* 311:808–811
- SE, Apps P (2007) Production in food of 1, 3-pentadiene and styrene by *Trichoderma* species. *Int J Food Microbiol* 116:182–185
284. Picot, A., Hourcade-Marcolla, D., Barreau, C., Pinson-Gadais, L., Caron, D., Richard-Forget, F and Lannou, C. (2012). Interactions between *Fusarium verticillioides* and *Fusarium graminearum* in maize ears and consequences for fungal development and mycotoxin accumulation. *Plant Pathology* 61, 140-151.
285. Pieterse, C. M., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C., and Bakker, P. A. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual review of phytopathology*, 52, 347–375.
286. Pimentel, D., Levitan L. (1986). Pesticides: amounts applied and amounts reaching pests. *Bioscience* 36:86–91
287. Ploetz, R. C. (1994). Panama disease: Return of the first banana menace. *Int. J. Pest Manage.* 40:326-336.
288. Potts, M. (1994). Desiccation tolerance of prokaryotes. *Microbiol Rev* 58:755–805
289. Prasad, M., Srinivasan, R., Chaudhary, M., Choudhary, M., and Jat, L. K. (2019). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) for Sustainable Agriculture. *PGPR Amelioration in Sustainable Agriculture*, 129–157. doi:10.1016/b978-0-12815879-1.00007-0.
290. Prasad, S. R., Kamble, U. R., Sripathy, K, Udaya, B and Singh, D. P. (2016). Seed bio-priming for biotic and abiotic stress management. In: Singh DP, Singh HB, Prabha R (eds) *Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity: vol. 1: research perspectives*. Springer, New Delhi, pp 211–228.
291. Prasanna, R., Chaudhary, V., Gupta, V., Babu, S., Kumar, A., Singh, R., Shivay, Y and Nain, L. (2013). Cyanobacteria mediated plant growth

promotion and bioprotection against *Fusarium* wilt in tomato. European Journal of Plant Pathology.

136. 10.1007/s10658-013-0167-x.

292. Puhalla, J. E. (1985). Classification of strains of *Fusarium oxysporum* on the basis of vegetative compatibility. Can. J. Bot. 63: 179-183.

293. Puopolo, G., Palmieri, M.C., Giovannini, O and Pertot, I. (2015). Impact of temperature on the survival and the biocontrol efficacy of Lyso- bacter capsici AZ78 against *Phytophthora infestans*. Biocon- trol 60:681–689

294. Raaijmakers, J. M., van der Sluis, I., Koster, M., Bakker, P. A. H. M., Weisbeek, P. J., and Schippers, B. (1995). Utilization of heterologous siderophores and rhizosphere competence of fluorescent *Pseudomonas spp.* Can. J. Microbiol. 41, 126–135. doi: 10.1139/m95-017.

295. Rahmoune, Bilal., Abdelkader, M., Khelifi-Slaoui, M., Khelifi, L., Strueh, A., Erban, A., Kopka, J., Prell, J and Van Dongen, J. (2016). Isolation and characterization of three new PGPR and their effects on the growth of Arabidopsis and Datura plants.

296. Raio, A., Raio, A., Puopol, G., Masi, M., Danti, R., Della, R G and Evidente, A. (2011). Biocontrol of cypress canker by the phenazine producer *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* strain M71. Biological Control 58: 133-138.

297. Rajput, R., Singh, P., Singh, J., Ray, S., Vaishnav, A and Singh, H. (2019). Seed Biopriming Through Beneficial Rhizobacteria for Mitigating Soil-Borne and Seed-Borne Diseases.10.1007/978-981-13-6986-5\_7.

298. Ram, R.M., Tripathi, R., Birla, H., Dilnashin, H., Singh, S.P and Keswani, C. (2019). Mixed PGPR consortium: an effective modulator of antioxidant network for management of collar rot in cauliflower. Arch. Phytopathol. Plant Protect. 52 (7– 8),844–862.

299. Ramadan, E., Ahmed, A., Enas, A and Fekria, M. (2016). Plant growth promoting rhizobacteria and their potential for biocontrol of phytopathogens. Afr J Microbiol Res 10(15):486–504.

300. Ramette, A., Frapolli, M., Défago, G and Moëgne-Loccoz, Y. (2003). Phylogeny of HCN Synthase-Encoding hcnBC Genes in Biocontrol Fluorescent *Pseudomonads* and Its Relationship with Host Plant Species

- and HCN Synthesis Ability. *Molecular plant-microbe interactions* : MPMI. 16. 525-35. 10.1094/MPMI.2003.16.6.525.
301. Ramírez-Cariño, H., Guadarrama, P., Sánchez, V., Cuervo-Parra, J., Ramírez-Reyes, T., Dunlap, C and Valadez-Blanco, R. (2020). Biocontrol of *Alternaria alternata* and *Fusarium oxysporum* by *Trichoderma asperelloides* and *Bacillus paralicheniformis* in tomato plants. *Antonie van Leeuwenhoek*. 113. 12471261.10.1007/s10482-020-01433-2.
302. Randall, C.R. (1980). Comparative pathogenicity and host ranges of *Fusarium oxysporum* isolates causing crown and rot of green house and field-grown tomatoes in North America and Japan. *Phytopathology* 70: 1143-1147.
303. Rani, V.D and Sudini, H.(2013). Management of soilborne diseases in crop plants: an overview. *Int J Plant Anim Environ Sci* 3(4):156–164.
304. Rataj-Guranowska, M. (1992). *Fusarium oxysporum* f.sp. *lupini* in Wielkopolska-genetic interrelationships. Pages 133-139 in: IHAR Radzikow (Eur. *Fusarium Semin.*, 3rd), Poznan,Poland.
305. Recorbet, G., Steinberg C., Olivain C., Edel, V., Trouvelot, S., DumasGaudot, E., Gianinazzi, S and Alabouvette C. (2003). Wanted: pathogenesis-related marker molecules for *Fusarium oxysporum*. *New Phytol* 159: 73–92.
306. Reddy, P. (2013). Bio-priming of Seeds. 10.1007/978-81-322-0723-8\_6.
307. Reis, A., Costa, H., Boiteux, L.S and Lopes, C.A. (2005). First report of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* race 3 on tomato in Brazil. *Fitopatologia Brasileira* 30:426-428.
308. Ren, L., Lou, Y., Sakamoto, K., Inubushi, K., Amemiya, Y., Shen, Q and Xu, G. (2010). Effects of Arbuscular Mycorrhizal Colonization on Microbial Community in Rhizosphere Soil and *Fusarium* Wilt Disease in Tomato. *Communications in Soil Science and Plant Analysis - Commun Soil Sci Plant Anal*. 41. 13991410.10.1080/00103621003760
309. Renaud, V. (2003). Tomate. Tous les legumes courants, rares ou méconnus cultivables sous nos climats. Ulmer. Paris, Ulmer:135-137.

310. Renaud, V. (2006). Les tomates qui ont du gout. Paris. Éditions Eugen Ulmer. P95.
311. Resson, R., San Soong, F., Fitzgerald, J., Turczynowic, L., El Saadi, O., Roder, D., Maynard, T and Falconer, I. (1994). Health effects of toxic cyanobacteria (blue-green algae):27–69.
312. Rick, C.M; Laterrot, H and Philouze, J. (1990). A revised key for the *Lycopersici* species. Report Tomato Genet Coop: 31-40.
313. Rijavec, T and Lapanje, A. (2017). Cyanogenic *Pseudomonas* spp. strains are concentrated in the rhizosphere of alpine pioneer plants. Microbiol Res 194:20– 28
314. Rinehart, K.L., Namikoshi, M., Choi, B.W. (1994). Structure and biosynthesis of toxins from blue-green algae (cyanobacteria). J Appl Phycol 6:159–176
315. Robbins, W.J., Hervey, A. and Stebbins, M. (1951). Further observations on Euglena and B12. Bull Torrey Bot Club 86, 367–373
316. Rosewich, U. L., Pettway, R. E., Kistler, H. C and Katan, T. (1997). Morphological and molecular characterization of isolates of *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis-lycopersici* from Florida. (Abstr.) Page 83 in: Abstr. Fungal Genet. Conf., 19th. Fungal Genetics Stock Center, Kansas City, KS.
317. Rouxel, F., Alabouvette, C. et Louvert, J. (1979). « Recherches sur la résistance des sols aux maladies. II- Incidence de traitements thermiques sur la résistance microbiologique d'un sol à la Fusariose vasculaire du melon », Ann Phytopathol., 183-192.
318. Rovira, A.D and Wildermuth, G.B. (1981). The nature and mechanism of suppression. In: Asher MJC, Shipton PJ (eds) Biology and control of take all. Academic, New York, pp 385–415
319. Saharan, B.S and Nahra, V. (2011). Plant Growth Promoting Rhizobacteria : A Critical Review. Life Sciences and Medicine Research, Volume2011: LSMR-21. P1.
320. Sallam, N., Eraky, A., Sallam, A. (2019). Effect of *Trichoderma* spp. on *Fusarium* wilt disease of tomato. Molecular Biology Reports. doi:10.1007/s11033019- 04901-9.

321. Sands, D., Ford, E., Miller, R., Sally, B., McCarthy, M., Anderson, T., Weaver, M., Morgan, C., Pilgeram, A., and Darlington, L. (1997). Characterization of a vascular wilt of *Erythroxylum coca* caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *erythroxyli* forma specialis nova. Plant Dis. 81:501-504.
322. Sawant, V and Bhale, U. (2019). Effect of Mycorrhizae and PGPF growth of tomato CVTO1389. 16. 8-11.
323. Scheknecht S., Mammerler, R., Steinkellner, S and Vierheilig, H. (2006). Root exudates of mycorrhizal tomato plants exhibit a different effect on microconidia germination of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* than root exudates from nonmycorrhizal tomato plants. Mycorrhiza. 16(5):365-370
324. Scher, E.M. and Baker, R. (1980). Mechanism of biological control in a *Fusarium*- suppressive soil. Phytopathology 70: 412-417
325. Schnürer, J and Magnusson, J. (2005). Antifungal lactic acid bacteria as biopreservatives. Trends Food Sci. Technol.16, 70–78
326. Schumann, E. (1996). Tomates, Chantecler, Belgique. P79.
327. Scott, I.T. (1923). The influence of hydrogen-ion concentration on the growth of *fusarium lycopersici* and tomato wilt. Missouri Agricultural Experiment Station Research Bulletin 64.
328. Sehrawat, A and Sindhu, S.S. (2019). Potential of biocontrol agents in plant disease control for improving food safety. Def Life Sci J 4(4):220–225
329. Sergeeva, E., Liaimer, A and Bergman, B. (2002). Evidence for production of the phytohormone indole-3- acetic acid by cyanobacteria. Planta 215:229–238
330. Shah, A.K and Vaidya, B.S. (1977). Detection of Vitamin B12 & pantothenic acid in cell exudates of blue green algae. Biol Plant 42, 6–429.
331. Shankara, N., Van lidt de jeude, J., De Goffau, M., Hilmi, M., Van Dam, B. et Florijin, A. (2005). La culture de la tomate : Production, transformation et commercialisation. 5<sup>ème</sup> (ed). Foundation Agromisa et CTA, Wageningen.
332. Shanmugam, V and Kanoujia, N. (2011). Biological management of vascular wilt of tomato caused by *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* by plant growthpromoting rhizobacterial mixture, Biological control, Volume 57, Issue 2, Pages 8593.

333. Sharma, A., Johri, B.N., Sharma, A.K and Glick, B.R. (2003). Plant growthpromoting bacterium *Pseudomonas* sp. strain GRP 3 influences iron acquisition in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilzeck). *Soil Biology and Biochemistry* 35 (7), 887894.
334. Sharoni, Y. and Levi, Y. (2006). Cancer prevention by dietary tomato lycopene and its molecular mechanisms. In A. V. Rao. Ed. *Tomatoes, lycopene & human health*. Barcelona: Caledonian Science Press: 111–125p.
335. Shipton, P., Cook, R and Sitton, J. (1973). Occurrence and transfer of a biological factor in soil that suppresses take-all of wheat in eastern Washington. *Phytopathology* 63: 511-517.
336. Si Mohammed, A. (2017). Caractérisation et lutte biologique vis-à-vis de *Fusarium oxysporum*. Thèse de doctorat d'état. Université d'Oran. 07p.
337. Siasou, E., Standing, D., Killham, K and Johnson, D. (2009). Mycorrhizal fungi increase biocontrol potential of *Pseudomonas fluorescens*. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 1341–1343
338. Siddegowda, R., Kamble, U., Sripathy, K.V., Bhaskar, K and Singh, D. (2016). Seed Bio-priming for Biotic and Abiotic Stress Management. *Microbial Inoculants in Sustainable* 10.1007/978-81-322-2647-5\_12.
339. Siegel-Hertz, K., Edel-Hermann, V., Chapelle, E., Terrat, S and Raaijmakers, J. C. (2018). Comparative Microbiome Analysis of a *Fusarium* Wilt Suppressive Soil and a *Fusarium* Wilt Conducive Soil From the Châteaurenard Region. *Front. Microbiol.* 9:568. doi:10.3389/fmicb.2018.00568.
340. Silipo, A., Erbs, G., Shinya, T., Dow, J.M., Parrilli, M., Lanzetta, R., Shibuya, N., Newman, M. A and Molinaro, A. (2010). Glyco-conjugates as elicitors or suppressors of plant innate immunity. *Glycobiology*. 20. 406-19. 10.1093/glycob/cwp201.
341. Silva, J.C and Bettioli, W. (2010). Potential of non-pathogenic *Fusarium oxysporum* isolates for control of *Fusarium* wilt of tomato. *Fitopatologia Brasileira* 30:409-412. 2005.
342. Sindhu, S.S., Parmar, P., Phour, M and Sehrawat, A. (2016). Potassiumsolubilizing microorganisms (KSMs) and its effect on plant

- growth improvement. Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture. Springer, India, pp. 171185.
343. Singh, P., Singh, J., Ray, S., Rajput, R., Vaishnav, A., Singh, R and Singh, H. (2020). Seed biopriming with antagonistic microbes and ascorbic acid induce resistance in tomato against *Fusarium* wilt. Microbiological Research. 237. 126482. 10.1016/j.micres.2020.126482.
344. Singh, S. (2014). A review on possible elicitor molecules of cyanobacteria: Their role in improving plant growth and providing tolerance against biotic or abiotic stress. Journal of Applied Microbiology. 117. 10.1111/jam.12612.
345. Singh, S. P and Gaur, R. (2017). Endophytic *Streptomyces* sp. underscore induction of defense regulatory genes and confers resistance against *Sclerotium rolfsii* in chickpea. Biol Control 104:44–56
346. Singh, V., Govind, G., Shailendra, S. P., Narendra, K. A and Sunil, K. S. (2015). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture.
347. Sjögren, J., Magnusson, J., Broberg, A., Schnürer, A., and Kenne, L. (2003). Appl. Environ. Microbiol. vol. 69, pp. 7554–7557.
348. Smith, S.E and Gianinazzi-Pearson, V. (1988). Physiological interactions between symbionts in vesicular–arbuscular mycorrhizal plants. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 39:221–244.
349. Smith, S.E and Read, D. J. (2008). Mycorrhizal symbiosis. Academic, London
350. Sokolova, M.G., Akimova, G.P. and Vaishlya, O.B. (2011). Effect of phytohormones synthesized by rhizosphere bacteria on plants. Appl Biochem Microbiol 47, 274–278.
351. Somers, E., Vanderleyden, J and Srinivasan, M .(2004). Rhizosphere bacterial signalling: a love parade beneath our feet. Crit. Rev. Microbiol. 304:205– 240.
352. Someya, N., Tsuchiya, K., Yoshida, T., Noguchi, M and Sawada, H. (2006). Combined Use of the Biocontrol Bacterium *Pseudomonas fluorescens* Strain LRB3W1 with Reduced Fungicide Application for the Control of Tomato *Fusarium* Wilt. Biocontrol science. 11. 75-80. 10.4265/bio.11.75.
353. Sonkar, P. (2019). Identification and Characterization of Antagonism Band of Secondary Metabolite from *T. asperellum* MK045610 against *F.*

*oxysporum* f. sp. *ciceri* and *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* based on HPTLC and GC-MS.

International Journal of Plant and Environment 5(3): 215-218

354. Species, Second Edition. Pennsylvania State University Press, University Park.
355. Srivastava, R., Khalid, A., Singh, U.S and Sharma, A. K. (2010). Evaluation of arbuscular mycorrhizal fungus, fluorescent *Pseudomonas* and *Trichoderma harzianum* formulation against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* for the management of tomato wilt. Biol Control 53:24–31. [https:// doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.11.012](https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.11.012)
356. Stoppacher, N., Kluger, B., Zeilinger, S., Krska R and Schuhmacher, R. (2010). Identification and profiling of volatile metabolites of the bio- control fungus *Trichoderma atroviride* by HS- SPME-GC-MS. J Microbiol Methods 81:187–193
357. Stover, R. H.(1962). Fusarial wilt (Panama disease) of bananas and other Musa species. Commonwealth Mycological Institute, p 117
358. Stoyanova, L.G., Ustyugova, E.A., Sultimova, T.D., Bilanenko, E.N., Fedorova, G.B., Khatrukha, G.S., and Netrusov, A.I. (2010). Agricult. Biol. Sci.vol. 5, pp. 477–485
359. Strano, C. P., Bella, P., Licciardello, G., Caruso, A and Catara, V. (2017). Role of secondary metabolites in the biocontrol activity of *Pseudomonas corrugata* and *Pseudomonas mediterranea*. Eur J Plant Pathol 149:103–115
360. Stravato, V.M. (1999). First report of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* race 2 on tomato in Italy. Plant Disease 83:967.
361. Streeter, J. G.(2003). Effect of trehalose on survival of *Bradyrhizobium japonicum* during desiccation. J Appl Microbiol 95:484–491
362. Ström, K., Sjögren, J., Broberg, A., and Schnürer, J. ( 2002). Appl. Environ. Microbiol. vol. 68, pp. 4322– 4327.
363. Suleiman A. S., Gambo, M. S and Sunusi, M. (2019). An in vitro antagonistic effect of *Trichoderma spp.* against *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*. International Journal of Fruit Science 0:0. Federal University Dutse. Vol. 3 No. pp 369 -374.

364. Sun, Z. B., Sun, M. H., Zhou, M and Li, S. D. (2017). Transformation of the endochitinase gene Chi67- 1 in *Clonostachys rosea* 67-1 increases its biocontrol activity against *Sclerotinia sclerotiorum*. *AMB Express* 7:1.
365. Tabassum, B., Khan, A., Tariq, R., Ramzan, M., Khan, M. S., Khan, I., Shahid, N and Aaliya, K. (2017). Review Bottlenecks in commercialisation and future prospects of PGPR. *Applied Soil Ecology*.
366. Tabatabaei, F.S and Saeedizadeh, A. (2017). Rhizobacteria cooperative effect against *Meloidogyne javanica* in rhizosphere of legume seedlings. *Hellenic Plant Protection Journal*.10, 25-34.
367. Tailor, A.J and Joshi, B.H. (2014). Harnessing plant growth promoting rhizobacteria beyond nature: A Review. *J Plant Nutr*, 37, 9.
368. Tang, B., Laborda, P., Sun, C., Xu, G., Zhao, Y and Liu, F. (2019). Improving the production of a novel antifungal alteramide B in *Lysobacter enzymogenes* OH11 by strengthening metabolic flux and precursor supply. *Bioresour Technol* 273:196– 202
369. Tantaoui, A., Ouinten, M., Geiger, J.-P., and Fernandez, D. (1996). Characterization of a single clonal lineage of *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* causing Bayoud disease of date palm in Morocco. *Phytopathology* 86:787-792
370. Tayal, P., Kapoor, R., and Bhatnagar, A. K. (2011). Functional synergism among *Glomus fasciculatum*, *Trichoderma viride*, and *Pseudomonas fluorescens* on *Fusarium* wilt in tomato. *J. Plant Pathol.* 93:745-750.
371. Taylor, A. G and Harman, G. E. (1990). Concept and technologies of selected seed treatments. *Annu Rev Phytopathol* 28:321–339
372. Teymouri, M., Ebrahimipour, G., Karkhane, M and Marzban, A. (2016). Metal resistant and phosphate solubilizing bacterium improves maize (*Zea mays*) growth and mitigates metal accumulation in plant. *Biocatal Agric Biotechnol.* 8, 13–17
373. Tiwari, S., Lata, C., Chauhan, P.S and Nautiyal, C.S. (2016). *Pseudomonas putida* attunes morphophysiological, biochemical and molecular responses in *Cicer arietinum* L. during drought stress and recovery. *Plant Physiol. Biochem.* 99, 108– 117.
374. Toussoun, T. A., and Nelson, P.E. (1976). A Pictorial Guide to the Identification of *Fusarium*

375. Touze, A. (1979). Les moyens de défense des plantes contre les microorganismes parasites. In : Les relations hôte parasite Bull.Soc.Bot.Fr 126,103-110.
376. Tucci, I. M., Ruocco, M., De masi, L., De Palma, M and Lorito, M. (2011). The beneficial effect of *Trichoderma* spp. on tomato is modulated by the plant genotype. Molecular Plant Pathology, 12(4), 341–354.
377. Ulloa-Ogaz, A. L., Muñoz-Castellanos, L. N and Nevárez-Moorillón, G.V. (2015). Biocontrol of phytopathogens: antibiotic production as mechanism of control.
378. Vaikuntapu, P.R., Dutta, S., Samudrala, R.B., Rao, V.R.V.N., Kalam, S and Podile, A.R. (2014). Preferential promotion of *Lycopersicon esculentum* (Tomato) growth by plant growth promoting bacteria associated with tomato. Indian J. Microbiol.54, 403–412.
379. Van Der Does, H. C., Lievens, B., Claes, L., Houterman, P. M., Cornelissen, B. J. Cand Rep, M. (2008). The presence of a virulence locus discriminates *Fusarium oxysporum* isolates causing tomato wilt from other isolates. Environmental Microbiology, 10(6), 1475– 1485. doi:10.1111/j.1462-2920.2007.01561.x
380. Van der Hofstad, G. A. J. M., Marugg, J. D., Verjans, G. M. G. M and Weisbeek, P. J. (1986). Characterization and Structural Analysis of the Siderophore Produced by the PGPR *Pseudomonas putida* Strain WCS358. Iron, Siderophores, and Plant Diseases, 71– 75.
381. Van Loon, L.C., Bakker, P and Pieterse, C.M.J. (2007). Antagonistic fungi, *Trichoderma* spp.: panoply of biological control. Vol 4, n°1. P118.
382. Velivelli, S., Kromann, P and Lojan, P. (2015). Identification of mVOCs from Andean rhizobacteria and field evaluation of bacterial and mycorrhizal inoculants on growth of potato in its center of origin. Microb Ecol. 69(3): 652-67.
383. Venter, S. L., Theron, D. J., Steyn, P. J., Ferreira, D. I., and Eicker, A. (1992). Relationship between vegetative compatibility and pathogenicity of isolates of *Fusarium oxysporum* f. sp. *tuberosi* from potato. Phytopathology82:858-862.

384. Viorica, L. L., Delian, E., Badulescu, L., Dobrescu, A and Chira, L. (2017). A brief overview of seed priming benefits in tomato. Romanian Biotechnological Letters. Vol. 22, No. 3.
385. Volin, R. B and Jones, J. P. (1982). A new race of *fusarium* wilt of tomato in Florida and sources of resistance. Proc. Fla. State Hortic. Soc. 95:268-270.
386. Walker, J.C. (1971). *Fusarium* Wilt of tomato. The American Phytopathological Society. 56p.
387. Wang, W., Shi, J., Xie, Q., Jiang, Y., Yu, N and Wang, E. (2017). Nutrient Exchange and Regulation in Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis. Molecular Plant. 10.1016/j.molp.2017.07.012.
388. Wang, Y, Luo Y, Sui Y, Xie Z, Liu Y, Jiang M, Liu J .(2018). Exposure of *Candida oleophila* to sublethal salt stress induces an anti- oxidant response and improves biocontrol efficacy. Biol Control 127:109–115.
389. Watterson, J.C. (1986). Diseases. In: Atherton J.G., Rudich J. (eds) The Tomato Crop. The Tomato Crop (A scientific basis for improvement). Springer, Dordrecht.
390. Weller, D. M., Raaijmakers, J. M., Gardener, B. B. M and Thomashow, L. S.( 2002). Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens1. Annual review of phytopathology, 40(1), 309-348.
391. Wetterstrand, K. A. ( 2019 ). Coûts du séquençage de l'ADN: données du NHGRI Genome Sequencing Program (GSP).
392. Wiesel, L., Newton, A., Elliott, I., Booty, D., Gilroy, E., Birch, P and Hein, I. (2014). Molecular effects of resistance elicitors from biological origin and their potential for crop protection. Frontiers in plant science. 5. 655. 10.3389/fpls.2014.00655.
393. Wilkie, P., J., and Dye, D. W. (1974). *Pseudomonas cichoriica* using tomato and celery diseases in New Zealand. New Zealand Journal of Agricultural Research, 17(2), 123–130.

394. Williamson, B., Tudzynski, B., Tudzynski, P and Van Kan, J. A. L. (2007). *Botrytis cinerea*: the cause of grey mould disease. *Molecular Plant Pathology*, 8(5), 561- 580.
395. Windels, C.E. (1992). *Fusarium*. In “Methods for Research on Soilborne Phytopathogenic Fungi” (Singleton L.L, J.D.M et Rush C.M., eds), pp 115-128. American Phytopathological Society Press, St.Paul.
396. Woo, S. L., Zoina, A., Del Sorbo, G., Lorito, M., Nanni, B., Scala, F and Noviello, C. (1996). Characterization of *Fusarium oxysporum* f. sp. *phaseoli* by pathogenic races, VCGs, RFLPs, and RAPD. *Phytopathology* 86:966-973.
397. Woudt, L. P., Neuvel, A., Sikkema, A., van Grinsven, M. Q. J. M., de Milliano, W. A. J., Campbell, C. L and Leslie, J. F. (1995). Genetic variation in *Fusarium oxysporum* from cyclamen. *Phytopathology* 85:1348-1355.
398. Xu, Z., Xie, J., Zhang, H., Wang, D., Shen, Q and Zhang, R. (2019). Enhanced control of plant wilt disease by a xylose-inducible degQ gene engineered into *Bacillus velezensis* strain SQR9XYQ. *Phytopathology* 109:36–43
399. Yadav, S., Agrawal, M., Raipuria, N and Agrawal, M. K. (2016). Antimicrobial Activity of *Nostoc calcicola* (Cyanobacteria) isolated from central India against human pathogens. *Asian J Pharm (Suppl)* 10: S554
400. Yang, E and Chang, H. *Int. J.* (2010). *Food Microbiol.* vol. 139, pp. 56–63.
401. Yang, J., Kloepper, J.W and Ryu, C.M. (2009). Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. *Trends Plant Sci* 14, 1–4.
402. Yang, M., Mavrodi, D. V, Mavrodi, O. V, Thomashow, L. S and Weller, D. M. (2017). Construction of a recombinant strain of *Pseudomonas fluorescens* producing both phenazine-1-carboxylic acid and cyclic lipopeptide for the biocontrol of take-all disease of wheat. *Eur J Plant Pathol* 149:683–694
403. Zameer, M., Zahid, H., Tabassum, B., Ali, Q., Nasir, I.A., Saleem, M and Butt, S.J. (2016). PGPR potentially improve growth of tomato plants in salt-stressed environment. *Turk. J. Agric. – Food Sci. Technol.* 4 (6), 455–463.
404. Zaw, M., and Matsumoto, M. (2020). Plant growth promotion of *trichoderma virens* Tv911 on some vegetables and its antagonistic effect on *fusarium* wilt of tomato. *Environmental Control in Biology*, 58(1), 7-14.

405. Zerrouk, I. Z., Rahmoune, B., Khelifi, L., Mounir, K., Baluska, F and LudwigMüller, J. (2019). Algerian Sahara PGPR confers maize root tolerance to salt and aluminum toxicity via ACC deaminase and IAA. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(6). 406. Zhao, Q., Ran, W., Wang, H., Li, X., Shen, Q., Shen, S and Xu, Y. (2013).

Biocontrol of *Fusarium* wilt disease in muskmelon with *Bacillus subtilis* Y-IVl.

Biocontrol 58:283–292.

407. Zhao, X., Mehrabi, R and Xu, J. R. (2007). Mitogen-activated protein kinase pathways and fungal pathogenesis. *Eukaryotic Cell*. 6;(10):1701-1714