

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE



Réf :/UAMOB/FSNVST/DEP.BIO/20

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER

Domaine : SNV Filière : Biotechnologie
Spécialité : Biotechnologie Microbienne

Présenté par :

MEDJDOUB Tiziri & KERFAH Hadjer

Thème

**Rôle des PGPR dans la protection de la tomate contre la
pourriture grise due à *Botrytis cinerea***

Soutenu le : 24 / 09 / 2020

Devant le jury composé de

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>		
<i>REMINI Hocine</i>	<i>MCB</i>	<i>Univ. de Bouira</i>	<i>Président</i>
<i>MAHDJOUB M. Malik</i>	<i>MCB</i>	<i>Univ. de Bouira</i>	<i>Examineur</i>
<i>RAI Abdelwahab</i>	<i>MCB</i>	<i>Univ. de Bouira</i>	<i>Promoteur</i>

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude tout d'abord à dieu de nous avoir donné courage, volonté, santé et force pour réaliser ce travail.

Nous remercions vivement M. Raï Abdelwahab d'avoir accepté de nous encadrer ainsi que pour tous ses conseils, son suivi et sa disponibilité.

Nos remerciements sont également adressés à M. Remini Hocine qui a généreusement accepté de présider le jury de notre soutenance et à M. MAHDJOUB Mohamed Malik d'avoir accepté l'examen de ce travail et sa mise en valeur.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants qui ont veillé à notre formation durant notre parcours Universitaire.

Enfin, nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Dédicace

Au nom de l'amour et du respect, je dédie ce modeste travail aux être les plus chers ;

A celle qui a consacré sa vie pour mon éducation et ma réussite. A la lumière de mes jours, pour sa tendresse, compréhension et son soutien moral, à ma très chère maman ;

A mon très Cher papa, qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci ;

A ma très chère grand-mère paternelle, qui m'a entourée de son amour, son soutien et son affection. Que dieu la garde pour moi, elle et ma cher tante Fatíha ;

A mes adorables sœurs Meriem et Maroua, ma grande sœur Sarah et son mari Saïd, ainsi qu'à leur petits enfants Hadil et Mohamed Nadhir ;

A mes chers frères Sidali, Imad dîne, Mohamed Islam et le petit Zohir.

A mes oncles ALI, Ahmed et sa femme Baya. A mes tantes maternel Hadda, Wahiba et son Mari Mousa ;

A toute mes amies et surtout : Keltoum, Roukia, Chahrazed, Soumia et waffa et à ma binôme Tiziri et sa famille.

Hadjer

Je dédie ce mémoire A mon idole, la personne la plus précieuse dans ce monde pour moi, ma chère maman

« Hadiouche Nassima » qui a toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait, qui m'a soutenu et encouragé tout au long de mon parcours et qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

A l'homme qu'autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soient-elles ne sauraient exprimer ma gratitude car, tout simplement, il est unique, mon merveilleux cher papa

« Medjdoub Ahmed ». Merci pour tout ce que tu m'as appris

A ma chère sœur qui a toujours été là pour moi. Tous les jolis mots ne suffisent pas pour te remercier pour ce que tu as fait pour moi, A toi ma sœur d'amour « Medjdoub Drifa ».

A mes frères, « Fouad » et « Karim »

A mon très chère frère « Massi » je te remercier énormément, tu étais toujours là pour moi dans tous les moments de ma vie et je te serais toujours reconnaissante. Que Dieu te protège et te garde pour moi.

A mon mari « Yahiaoui Mohhamed » qui compte beaucoup pour moi et qui a de valeur à mes yeux. Je tien à te remercier, tu m'as toujours soutenu. Tu étais toujours à mes coté. Tu m'as toujours donné la force de continuer. Je te confirme mon attachement et mon amour. Que Dieu te protège et te garde pour moi.

A ma belle-mère Akila, mon beau-père Monad Amezian, mes belles-soeurs Lydia, Rosa et Nadia et mon beau-frère Mohand Cherif.

Je vous remercie tout particulièrement pour votre soutien et affection. Trouvez dans ce travail le témoin de mon affection et estime.

A mes chères amies Wahiba, Manel, Ibtissem, Sara, Dounia, Lilia, Rayan, Ines etc., qui ont été là pour moi et surtout m'ont entouré de leur chaleureuse énergie. Je vous souhaite plus de succès.

A ma binôme « Hadjer », avec qui j'ai partagé ce modeste travail.

Je tiens à remercier vivement tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce mémoire.

Tiziri.

Liste des Tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1. Valeur nutritionnelle moyenne pour 100g de tomate crue	23
Tableau 2. Récapitulation des travaux récents dans le domaine de la lutte biologique contre <i>B. cinerea</i> sur plante de tomate	32

Liste des Figures

Liste des figures

Figure 1. Stimulation de la croissance des plantes par les PGPR	6
Figure 2. Biosynthèse des gibbérellines	9
Figure 3. Biosynthèse des cytokines	10
Figure 4. Mouvement du phosphate dans les sols	12
Figure 5. Amélioration de la disponibilité de l'azote (N), du phosphate (P) et du potassium (K) par les PGPR	13
Figure 6. Tolérance Systémique Induite par les PGPR. Les flèches discontinues indiquent les composés bioactifs sécrétés par le PGPR. Les flèches pleines indiquent les composés végétaux affectés par les composants bactériens	14
Figure 7. Rôle de l'ACC désaminase bactérien dans la réduction des niveaux de l'éthylène végétal.....	15
Figure 8. Les étapes de la résistance systémique induite chez les plantes par les PGPR	20
Figure 9. Aspect de la culture d'une souche de <i>B. cinerea</i> sur un milieu de culture PDA	24
Figure 10. Cycle de développement de <i>B. cinerea</i>	26
Figure 11. Effet de <i>B. cinerea</i> sur des feuilles détachées de la tomate.....	27
Figure 12. Effet de <i>B. cinerea</i> sur le fruit de la tomate.....	27
Figure 13. Effet de <i>B. cinerea</i> sur la partie aérienne d'une plante de tomate	28

Liste des Abréviations

Liste des abréviations

PGPR : *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*, pour : (Rhizobactéries Promotrices de la croissance des plantes).

PSB : Phosphate solubilizing bacteria, pour : (Bactéries solubilisatrices du phosphate).

ACC : 1-Aminocyclopropane, 1-carboxylate désaminase.

AIA : Acide Indole Acétique.

HCN : Cyanure d'Hydrogène.

RSI : Résistance Systémique Induite.

Sommaire

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
Liste des abréviations	vii

Introduction	1
---------------------------	---

Premier chapitre. Les bactéries promotrices de la croissance des plantes

I. Les PGPR	3
II. Notions de base	3
1. La rhizosphère	3
2. Fertilisant	4
3. Biofertilisant	5
4. Fongicide	5
5. Biofongicide	5
III. Mécanismes d'action des PGPR	6
1. Rôle des PGPR comme biofertilisants	7
1.1. Production des phytohormones	7
1.2. Fixation de l'azote Atmosphérique	10
1.3. Solubilisation du phosphate	11
1.4. Induction de la tolérance systémique aux stressés abiotiques	13
1.5. Ethylène et ACC désaminase bactérienne	14
2. Comme agents de lutte biologique	15
2.1. L'antibiose	15
2.2. Synthèse des sidérophores bactériens	16
2.3. Colonisation racinaire et compétition pour les nutriments	17
2.4. L'HCN bactérien comme substance antifongique	17

2.5.	Production d'enzymes lytiques.....	18
2.6.	La résistance systémique induite (RSI).....	19

Deuxième chapitre. La pourriture grise de la tomate

I.	La Tomate « <i>Solanum lycopersicum</i> ».....	21
1.	Description botanique de la plante	21
2.	Taxonomie.....	22
3.	Valeur nutritionnelle	22
II.	La pourriture grise de la tomate.....	23
1.	Les maladies fongiques de la tomate	23
2.	<i>Botrytis cinerea</i>	24
2.1.	Taxonomie	25
2.2.	Cycle de développement.....	25
2.3.	La pourriture grise de la tomate causée par <i>Botrytis cinerea</i>	26

Troisième chapitre. Avancées et perspectives

I.	Avancées	29
II.	Lecture critique et perspectives	34

Conclusion	36
-------------------------	-----------

Références bibliographiques

Résumé

Introduction

Introduction

L'un des besoins fondamentaux de l'homme, ayant un rôle important dans la santé, la stabilité et le développement des sociétés, est bien l'alimentation. Cette dernière est principalement issue de l'agriculture et des industries agroalimentaires (**Glick *et al.*, 2014**).

Dans les deux dernières décennies, une augmentation intensive de l'utilisation des engrais, des fongicides et des pesticides chimiques a été constatée. Ce phénomène a conduit à des pratiques agricoles intensives et à peine suffisantes pour nourrir la planète (**Khan *et al.*, 2009**). L'utilisation excessive de ces produits chimiques a entraîné une augmentation des coûts agricoles au monde entier (**Jewell *et al.*, 2010**). En plus, les risques écologiques de ces produits tels que les contaminations des réseaux d'eaux, la dégradation du sol, l'expansion de l'aridité, et le déséquilibre microbiologique des flores naturels sont énormes (**Jewell *et al.*, 2010**).

D'un autre côté, les pratiques agricoles sont menacées par divers stress abiotiques et biotiques, nécessitant davantage d'exploitation des ressources pour éviter une baisse de la productivité (**Singh *et al.*, 2014**). Parmi ces défis, les champignons phytopathogènes sont responsables de 10 et 20% des pertes de rendement dans les pays développés et sous-développés respectivement ; où des champignons comme *Botrytis* spp., *Aspergillus* spp., *Mucor* spp., *Fusarium* spp., *Thielaviopsis* spp., *Verticillium* spp., *Ustilago* spp., *Rhizoctonia* spp. et *Puccinia* spp. sont dans la première ligne d'implication (**Glick, 2015 ; Peng, *et al.*, 2015 ; Reddy, 2015**). Leur virulence présente une diversité considérable à la fois dans leur biologie du développement et dans les types de symptômes induits (**Soanes *et al.*, 2002**).

Parmi les cultures agricoles les plus affecté par les champignons phytopathogènes, la tomate est l'une des plus affectées. Cette dernière, scientifiquement nommé « *Solanum lycopersicum* », appartient à la famille des Solanaceae, dont les produits de transformation sont estimés à 38 millions de ton dans le monde (**Dorais et Papadopoulos, 2007**).

Sous pression de l'application exagérée des fongicides chimiques, des phénomènes de résistance sont apparus dans les populations des pathogènes. Ajouté à ça, le coût élevé de ces produits, leur faible capacité de pénétration dans les tissus

infectés et leurs effets indésirables sur l'environnement ont mené les scientifiques à la recherche de nouvelles méthodes de lutte en harmonie avec la santé humaine, mais aussi avec l'équilibre biologique du sol afin d'éviter sa détérioration (**Paoletti et Pimentel, 1996 ; Komárek *et al.*, 2010 ; Hollomon, 2015**).

Parmi ces méthodes, la lutte biologique utilisant des bactéries bénéfiques du sol comme biofongicides est la plus prometteuse. Ces bactéries, communément appelées PGPR, de l'anglais : *Plant Growth Promoting Bacteria*, signifiant : Bactéries Promotrices de la Croissance des Plantes, ne sont pas uniquement utilisées comme agents de lutte antipathogènes. Leur capacité à produire une large gamme de molécules, participant à la promotion de la croissance des plantes et l'amélioration de leur santé, fait de ces microorganismes, un outil vert qui occupe, de plus en plus, une place non négligeable en agriculture (**Beneduzi *et al.*, 2012**).

L'objectif initial de ce travail consistait à isoler, sélectionner et utiliser des souches bactériennes à activité antifongique pour la protection des plantes de tomate contre la pourriture grise due aux champignon phytopathogène *Botrytis cinerea*.

Cette année (2019/2020) a été marquée par des conditions de travail particulières. La pandémie due au COVID-19 a fortement influencé l'avancement des travaux pratiques de l'ensemble des étudiants en fin de cycle et a également fait en sorte que ce travail soit converti à une synthèse d'un ensemble de travaux scientifiques décrivant les mécanismes d'action des PGPR et leur rôle comme agents de lutte biologique contre *Botrytis cinerea*, un agent pathogène de la tomate.

Chapitre I
Les bactéries promotrices
de la croissance des
plantes

Le sol héberge une grande diversité microbienne (virus, bactéries, champignons protozoaires etc.). Les interactions entre ces microorganismes entre eux, et avec les autres composants du sol sont très complexes. La rhizosphère contient une grande diversité de bactéries appelés les rhizobactéries. Elles peuvent être neutres, pathogènes ou bénéfiques aux plantes qui les entourent. Le groupe des bactéries vivant autour, en contact ou à l'intérieur des racines et ayant la capacité d'apporter des avantages bénéfiques aux plantes sont communément appelé PGPR, de l'anglais : *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*, signifiant : bactéries promotrices de la croissance des plantes (**Rai et al., 2018**).

I. Les PGPR

Le terme PGPR a été utilisé pour la première fois par Kloepper et Schroth pour désigner les micro-organismes étroitement associés à la région de la rhizosphère et ayant le pouvoir d'affecter bénéfiquement la croissance d'une plante et sa santé (**Bakthavatchalu et al., 2012 ; Sivasakhi et al., 2014 ; Alabouvette et Cordier, 2018**).

Les PGPR jouent donc un rôle important comme agents de lutte contre les infections des plantes par des agents phytopathogènes (**Beneduzi et al., 2012**). Cette fonction est assurée, en grande partie, par la capacité inhérente à ces bactéries de produire des substances antifongiques et des phytohormones, de fixer l'azote atmosphérique et de réguler de la production d'éthylène par les plantes. Également, la solubilisation du phosphate vers des formes assimilables par les plantes et la production des chélateurs de Fer sont également des attributs des PGPR (**Prasade et al., 2005**).

Parmi la grande diversité des PGPR, celles appartenant aux genres *Bacillus*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Acetobacter*, *Burkholderia*, *Paenibacillus* sont prédominantes, mais jamais exclusives (**Sivasakhi et al., 2014**).

II. Notions de base

1. La rhizosphère

La rhizosphère est définie par Hiltner (1904) comme la zone du sol qui entoure la racine de la plante. C'est un environnement écologique dynamique où les microorganismes et les plantes interagissent souvent de façon symbiotique pour

l'exploitation du sol (**Chibani, 2017**). Il existe trois éléments distincts reconnus dans la rhizosphère :

- La rhizosphère proprement dite : la zone du sol influencée par les racines grâce à la libération de substrats affectant l'activité microbienne.
- Le rhizoplane : la surface de la racine, comprenant des particules de sol fortement adhérentes.
- La racine elle-même : une partie du système car certains micro-organismes endophytes sont capables de coloniser les tissus des racines internes (**Arif, 2012**).

La racine libère au sein de la rhizosphère divers éléments carbonés appelés « exsudats racinaires » ; un ensemble de sucres, acides aminés, acides organiques et hormones nécessaires au métabolisme des microorganismes de la rhizosphère (**Lepinay, 2013**).

2. Fertilisant

Pour une croissance optimale des plantes, les nutriments doivent être disponibles en quantité suffisante et équilibrées. Les sols contiennent des réserves naturelles en quantité limitée de macro- (ex. C, H, O, N, Ca, Mg, P, etc.) et de micronutriments (Cl, Fe, Mn, Zn, Cu, etc.). Ces réserves sont en grande partie sous des formes non disponibles pour les plantes et seule une partie est libérée chaque année par les activités biogéochimiques des sols. Suivant les rythmes et l'intensité des activités agricoles modernes, les processus de recyclage naturels se sont révélés inefficaces pour le maintien de la production à des niveaux suffisants (**Chen, 2006**).

Les fertilisants ou « les engrais » sont donc des substances d'origine chimique conçues pour compléter les nutriments déjà présents dans le sol (**Yoldas et al., 2011**). L'ajout des fertilisants chimiques au sol est une méthode rapide pour améliorer la disponibilité et la quantité de ces nutriments aux produits agricoles. Les engrais chimiques, comprenant les engrais azotés, potassiques et phosphatés sont nécessaires pour fournir aux plants des nutriments solubles et immédiatement disponibles. D'autre part, les engrais chimiques affectent les activités enzymatiques des microorganismes et la structure du sol (**Biosvert, 2014**).

3. Biofertilisant

La biofertilisation est l'application d'un inoculum microbien ou d'une substance de base d'origine microbienne sur les graines/les surfaces des plantes ou le directement au sol. Le but en est l'amélioration de la croissance végétale et le rendement d'une plante (**Odoh, 2017**). Il est important de signaler que le terme biofertilisants ne doit pas être utilisé de manière interchangeable avec les termes suivants : les engrais verts, fumier, cultures intercalaire ou culture organique complétée d'engrais chimiques (**Benmati, 2014**).

Les PGPR ; des microorganismes présentant des attributs qui facilitent l'assimilation des nutriments par la plante, et stimulent sa croissance, sont donc considérés comme biofertilisants (**Laradj, 2017**).

4. Fongicide

Les fongicides sont des substances chimiques qui détruisent, affaiblissent ou inhibe les champignons pathogènes. Les fongicides chimiques sont commercialisés sous l'une des formes suivantes : poudre mouillable, suspension concentrée et granule à disperser (**Hannouni, 2012**).

Depuis des dizaines d'années, l'humanité a connu des perturbations graves au niveau de l'ensemble des écosystèmes et leurs constituants vivants. Ces perturbations sont dues, entre autres, à l'utilisation intensive et spontanée des substances chimiques en agriculture (**Jabali et Khelili, 2009**).

5. Biofongicide

La lutte chimique par les fongicides semble être un moyen efficace de lutte contre les parasites fongiques en agriculture. Cependant, elle présente de nombreux inconvénients tels que la pollution de l'environnement, le coût élevé et l'apparition continue des phénomènes de résistance dans les populations des pathogènes. Afin de surmonter ces contraintes, les scientifiques ont tourné leur attention vers l'exploitation de nouvelles stratégies de lutte biologique utilisant des microorganismes bénéfiques ou leurs produits de métabolisme moins coûteux et souvent non néfastes pour l'environnement. Ces microorganismes sont appelés biofongicides (**Goudjil et al., 2016**).

La protection conférée par les biofongicides s'appuie sur un ou plusieurs mécanismes d'action tels que la compétition (pour les éléments nutritifs, l'oxygène et l'espace), l'antibiose (production d'antibiotiques, de l'HCN etc.) et la production d'enzymes lytiques dégradant les membranes des cellules fongiques. Certains biofongicides sont également capables d'atténuer la virulence du pathogène et d'induire une résistance systémique chez la plante (Aouar, 2012).

III. Mécanismes d'action des PGPR

Les effets bénéfiques des PGPR sur la croissance végétale résultent de différents mécanismes dont les modes d'action sont directs ou indirects. En général, les mécanismes indirects se produisent en dehors de la plante, par contre les mécanismes directs sont ceux qui se produisent à l'intérieur des tissus de la plante, affectant directement son métabolisme (Gupta *et al.*, 2000 ; Cherif, 2014).

Selon leurs rôles dans la rhizosphère, Somer *et al.* (2004) ont classé les PGPR en :

- Phytostimulateurs,
- Rhizoremédiateurs
- Biopesticides.

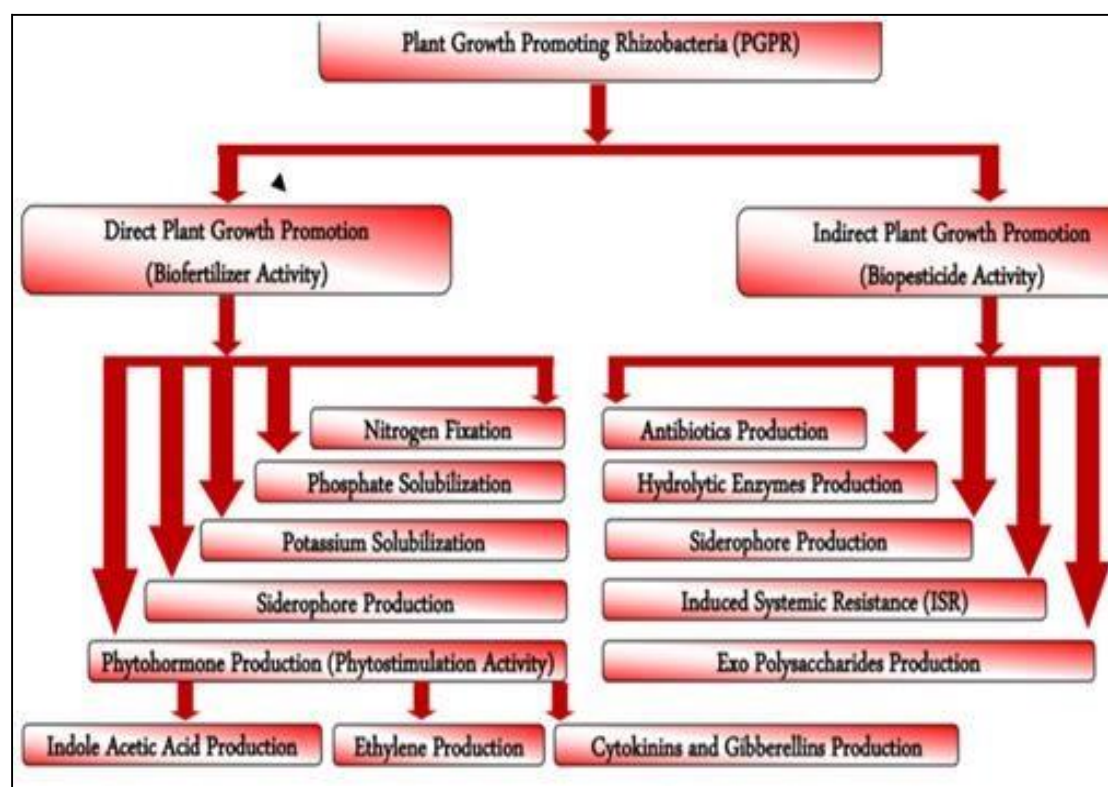


Figure 1. Stimulation de la croissance des plantes par les PGPR (Gupta *et al.*, 2002).

1. Rôle des PGPR comme biofertilisants

Le rôle des PGPR comme biofertilisants est attribué à plusieurs métabolites microbiens tels que :

1.1. Production des phytohormones

Les phytohormones sont des substances organiques naturelles qui influencent le développement des plantes et régulent, à faible concentrations, leur physiologie. Le nom auxin a été donné par Charles Darwin à la première phytohormone découverte en référence au terme « *αυξέιν* », un mot grec signifiant croître ou augmenter. Plus tard, les gibbérellines, l'éthylène, la cytokinine et l'acide abscissique ont rejoint les auxines pour être considérées comme « les cinq phytohormones classiques » (**Went et Thimann 1937 ; Kende et Zeevaart, 1997**).

La plupart des PGPR sont capables de synthétiser des phytohormones qui couvrent un énorme rôle en agriculture durable à travers la régulation et la compensation des hormones végétales (**kumar *et al.*, 2015**).

1.1.1. L'acide indole-3-acétique (AIA)

L'acide indole acétique (AIA) est l'auxine la plus couramment étudiée. Elle est produite dans le méristème apical des plantes mais peut se rencontrer dans toute la plante. L'AIA est également produite par une large gamme de bactéries du sol (*Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Microbacterium*, *Methylophages*, *Agromyces*, *Paenibacillus* etc.). L'AIA bactérien joue un rôle important dans la régulation de plusieurs processus de croissance de la plante (**Bal *et al.*, 2013 ; Ahemad et Kibret, 2014 ; Afzal *et al.*, 2015**).

L'AIA provoque des changements transcriptionnels des gènes hormonaux liés à la paroi cellulaire végétale (**Spaepen *et al.*, 2014**), stimulent l'élongation racinaire et le pouvoir d'absorption des nutriments (**Honge *et al.*, 1996 ; Reetha *et al.*, 2014**), augmentent la biomasse racinaire et diminuent la taille et la densité des stomates (**Backer *et al.*, 2018**) et activent les gènes de réponse aux stress, améliorant ainsi la croissance des plantes (**Ruzzi et Aroca, 2015**).

Différentes voies de biosynthèse sont utilisées par les bactéries pour la synthèse des auxines et, parfois, une seule souche bactérienne présente plusieurs voies de synthèse (**Patten et Glick, 1996**). A nos jours, plusieurs auxines sont synthétisées chimiquement : acide indole-3-butyrique (IBA), d'acides 2-méthyl-4-chlorophénoxyacétique (MCPA), acide indole-3-propionique (IPA), acide 2,4-dichlorophénoxyacétique (2,4-D), etc. (**Kumar et al., 2015**).

Selon **Davies et al. (2010)**, l'IAA joue un rôle dans :

- L'élargissement des cellules (stimulation de l'élargissement des cellules et la croissance de la tige).
- Division cellulaire (stimulation de la division cellulaire dans le cambium « écorce intérieur »).
- Différenciation des tissus vasculaires (stimulation de la différenciation du phloème et du xylème).
- Initiation racinaire (stimulation de l'initiation racinaire sur les boutures de tiges et développement des racines secondaires).
- Sénescence foliaire (retarde la sénescence foliaire).
- Abscission des feuilles et des fruits (l'auxine peut inhiber ou favoriser « via l'éthylène » l'abscission des feuilles et des fruits).
- Maturation des fruits.
- Floraison - l'auxine favorise la floraison des broméliacées.
- Croissance des parties florales (stimulée par l'auxine).
- Favorise la féminité des fleurs dioïques « via l'éthylène ».

1.1.2. Acide gibbérellique

La première gibbérelline (acide gibbérellique : GA) a été découverte en 1962 avec le champignon *Fusarium moniliforme* (*Gibberella fujikuroi* sous sa forme sexuelle), tandis que le premier signalement de gibbérellines bactériennes remonte à 1988 avec l'espèce *Rhizobium meliloti* (**Takahashi et al., 1972 ; Maheshwari et al., 2015**). La synthèse des gibbérellines bactériennes (Figure 2) commence par la conversion du géranylgeranyl-PP en ent-kaurene, qui est ensuite converti en GA12-aldéhyde. Après cela, le GA12-aldéhyde est oxydé en GA12 et métabolisé en un autre GA (**Kang et al., 2014**).

Le GA c'est une hormone régulatrice de la croissance des plantes, ces GA participe à un certain nombre de processus physiologiques, y compris la germination des graines, l'émergence des semis, croissance des tiges et des feuilles, floraison et croissance des fleurs et/ou des fruits (Vivanco et Jorge, 2000 ; King *et al.*, 2006). Ces hormones participent également au bourgeonnement et au retardement de la sénescence (Bottini et Luna, 1998 ; Reinoso *et al.*, 2002).

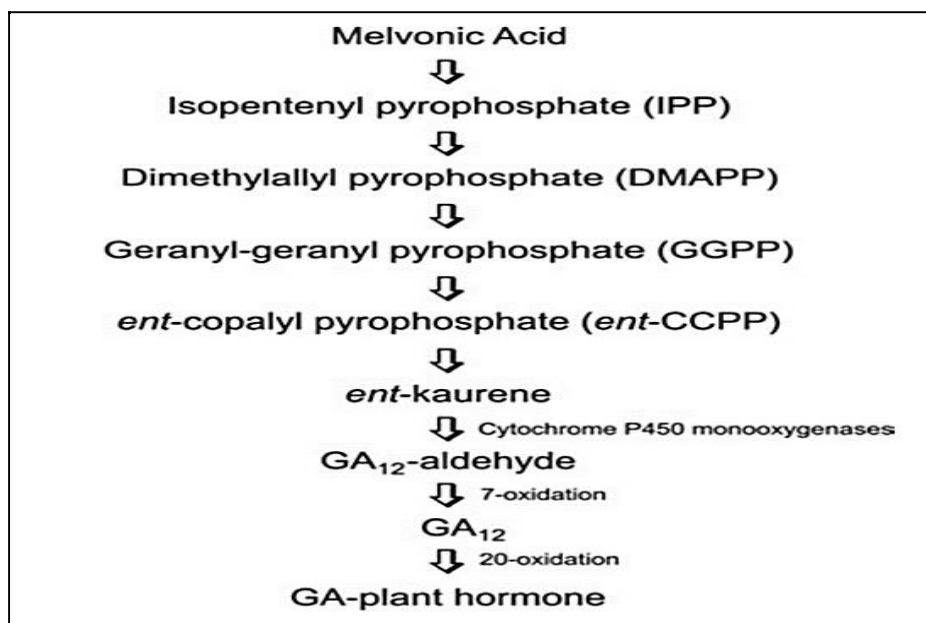


Figure 2. Biosynthèse des gibbérellines (Mahchwari *et al.*, 2015).

1.1.3. Cytokinines

Les cytokinines (CK) constituent un trait important pour la sélection de PGPR efficaces. Ils jouent un rôle crucial dans le contrôle de la division cellulaire végétale, du cycle cellulaire, de la sénescence des feuilles, la mobilisation des nutriments, la formation des méristèmes apicaux des pousses, la dormance et la germination des graines, le développement floral, etc. Chimiquement, les cytokinines sont des aminopurines substituées à l'azote 6, des isoprènes, isoprènes modifiés, des zéatine et des trans-zéatine (Figure 3) (Mok, 1994 ; Schaller *et al.*, 2014 ; Sokolova *et al.*, 2011).

Les cytokinines assurent également la médiation des réponses à des facteurs biotiques et abiotiques extrinsèques variables (Werner et Schmulling, 2009 ; Grosskinsky *et al.*, 2011 ; Gupta et Rashotte, 2012). Les CK régulent la biosynthèse et la biogenèse des chloroplastes et, donc, de la chlorophylle et

améliorent l'ouverture des stomates chez certains espèces (Davies, 2010 ; Cortleven et Schmulling, 2015).

Des bactéries comme *Azospirillum*, *Agrobacterium*, *Azotobacter*, *Achromobacter* et *Klebsiella* sont connues pour leur implication dans la régulation de la croissance des plantes via la production de cytokinines (Akiyoshi *et al.*, 1987 ; Taller et Wong, 1989 ; Conard *et al.*, 1992 ; Donderski et Gluchowska, 2000).

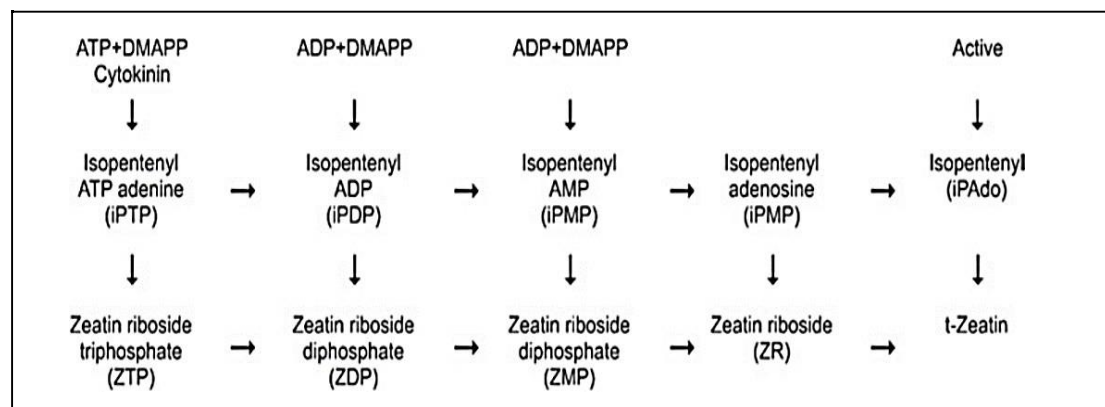


Figure 3. Biosynthèse des cytokinines (Kumar, 2015).

1.2. Fixation de l'azote Atmosphérique

L'azote est considéré comme un élément essentiel pour toutes les formes de la vie. Il représente 78% de l'atmosphère terrestre. C'est le nutriment le plus important pour la croissance et la productivité des plantes (Gupta *et al.*, 2000 ; Bhattacharyya *et al.*, 2012).

Malheureusement, aucune espèce végétale n'est capable de le rendre directement disponible pour sa croissance (Arora *et al.*, 2012). C'est donc un facteur limitant dans les écosystèmes agricoles (Bhattacharyya *et al.*, 2012).

Certains PGPR ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique et de le fournir aux plantes par deux mécanismes : symbiotique (la fixation symbiotique de l'azote est une relation mutualiste entre une bactérie et une plante, vivants en étroite liaison) (Gupta *et al.*, 2000), et non symbiotique (la fixation non symbiotique de l'azote s'effectue par des microorganismes vivant librement dans le sol) (Saxena et Tilak, 1998).

Les bactéries fixatrices d'azote font partie des bio-engrais, dont l'utilisation permet d'accroître la productivité et constitue une alternative viable qui contribue à

réduire la pollution due aux applications d'engrais chimiques, à préserver l'environnement et à baisser le coût de la production (**Cherif, 2014**).

L'azote atmosphérique N_2 est converti en formes utilisables par la plante à travers la fixation biologique par des microorganismes non symbiotiques dites (Diazotrophes), utilisant un système enzymatique complexe appelé nitrogénase (**Kim et Rees, 1994**).

La fixation symbiotique de l'azote est une relation mutualiste entre une bactérie et une plante. La bactérie pénètre dans la racine de la plante et forme des nodules où se produit la fixation d'azote. Les *rhizobiums* sont un vaste groupe de rhizobactéries qui ont le pouvoir d'établir des interactions symbiotiques par la colonisation et la formation des nodules racinaires avec des légumineuses dont l'azote est fixé en ammoniac disponible pour l'hôte (**Gupta et al., 2000 ; Munees et Mulugeta, 2014**).

Les gènes de fixation de l'azote, appelés (*nif*) se retrouvent dans les systèmes vivants symbiotiques et libres. Les gènes de la nitrogénase (*nif*) incluent les gènes structuraux impliqués dans l'activation de la protéine Fe (**Gupta et al., 2000**).

D'après **Ahemad et Khan (2011)**, les cyanobactéries (*Anabaena* spp. et *Nostoc* spp.), *Azospirillum* spp., *Azotobacter* spp., *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp. et *Azoarcus* spp. sont signalés parmi les bactéries libres ou à symbioses associatives au potentiel de fixation biologique d'azote le plus notable.

1.3. Solubilisation du phosphate

Le phosphate est considéré comme un élément clé dans la nutrition des plantes (**Gupta et al., 2000**). C'est l'élément le plus limitant de la croissance des plantes après l'azote. C'est un élément abondamment disponible dans les sols sous deux formes organique et inorganique (figure 4) (**Khan et al., 2009**). Le phosphate joue un rôle presque dans tous les principaux processus métaboliques des plantes comme : la photosynthèse, le transfert d'énergie, la transduction d'énergie, biosynthèse macromoléculaire et la respiration (**Gupta et al., 2000**).

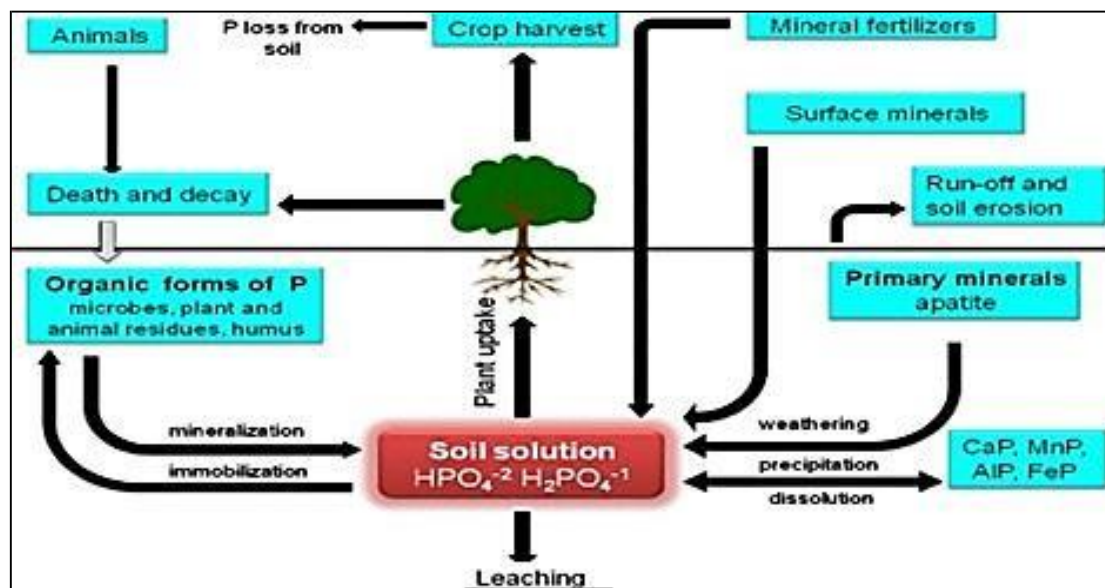


Figure 4. Mouvement du phosphate dans les sols (Gupta *et al.*, 2000).

Malheureusement, la plupart du phosphate terrestre, environ 95%, se présente sous forme insoluble, immobilisée et précipitée et, donc, inutilisable par les plantes (Ahmed *et al.*, 2014). Ce P insoluble est présent sous forme de minéraux inorganiques tel que l'apatite ou sous plusieurs formes organiques, notamment le phosphate d'inositol (phytate du sol), les phosphomonoesters et les phosphotriesters (Glick, 2012).

Certains PGPR présents dans le sol ont différentes stratégies pour utiliser les formes insolubles du phosphate et sont donc capables de le rendre disponible aux plantes. Ces bactéries sont communément appelées « **PSB** » de l'anglais *Phosphate Solubilizing Bacteria*, signifiant : les bactéries solubilisatrices du phosphate (Veeseey, 2003). Les bactéries des genres *Azotobacter*, *Bacillus*, *Beijerinckii*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Microbacterium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* et *Serratia* sont signalés comme des PSB (Bhattacharyya et Jha, 2012).

Les bactéries solubilisatrices du phosphate utilisent différents mécanismes de synthèse des formes solubles du phosphate (Illmer et Schinner, 1995 ; Gupta *et al.*, 2000 ; Thakuria *et al.*, 2004) :

- Production de molécules décomposeurs des minéraux, par ex : acides organiques, ions hydroxyles, CO₂.
- Libération d'enzymes extracellulaires (minéralisations biochimiques du phosphate).

- Libération du phosphate soluble pendant la dégradation des substrats organiques (minéralisation biologique).
- Les acides organiques peuvent également former des complexes solubles avec des ions métalliques associées à un P insoluble, libérant par la suite des formes solubles du phosphate.

L'utilisation des PSB permettra, sans doute, de diminuer l'utilisation d'engrais phosphatés facilement précipitables et perdu aux sols sous formes insolubles, en réduisant les coûts de production et en améliorant les rendements des cultures (Chaiharn et Lumyong, 2009).

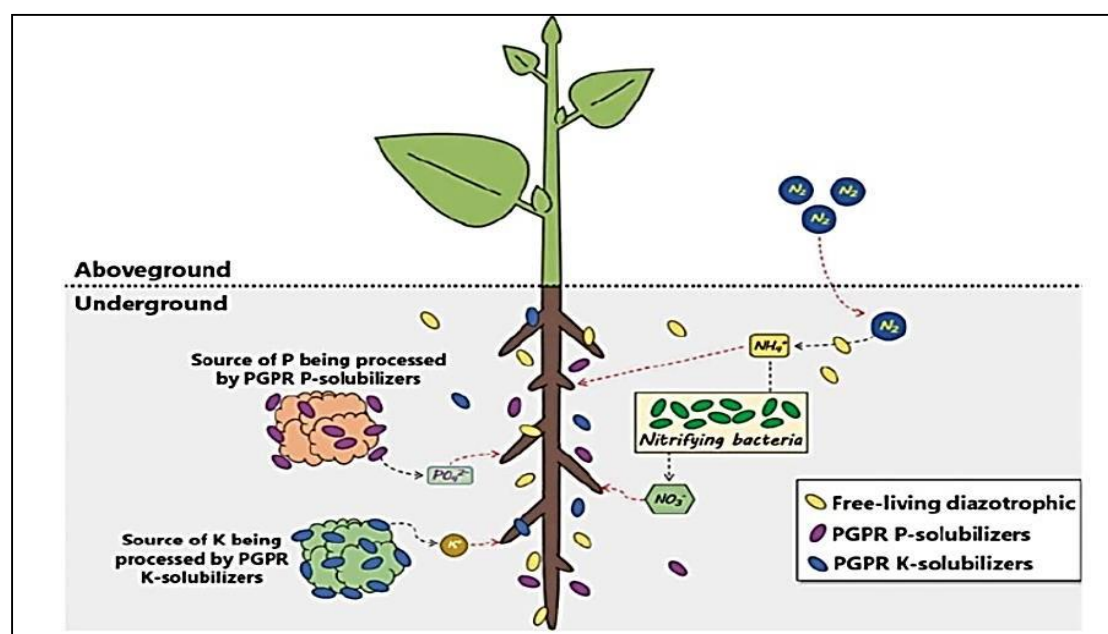


Figure 5. Amélioration de la disponibilité de l'azote (N), du phosphate (P) et du potassium (K) par les PGPR (Kumar *et al.*, 2014).

1.4. Induction de la tolérance systémique aux stress abiotiques

La réduction du rendement agricole est principalement causée par les stress abiotiques, cependant, l'intensité du stress abiotique varie en fonction du type de sol (c'est-à-dire la carence en hormones et les déséquilibres nutritionnels) et les facteurs végétaux (troubles physiologiques comme la sensibilité aux maladies, abscission, etc.). Plusieurs travaux ont mis en évidence le rôle de certains PGPR, en tant qu'inducteurs de tolérance des plantes au stress abiotique en provoquant des changements physiologiques et biochimiques dans leurs tissus, ce qui se traduit par une amélioration de leur tolérance aux stress environnementaux tels que la sécheresse,

la salinité et les métaux lourds. De telles interactions complexes entre plantes et bactéries sont connues sous le terme de « tolérance systémique induite » (Figure 6) (IST, de l'anglais : *Induced Systemic Tolerance*) (Rai et Nabti, 2017).

Entre autres bactéries, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter* et *Klebsiella* sont connus pour leur capacité à induire des modifications systémiques dans les tissus de plantes, aboutissant à l'amélioration de leur résistance à différents stress abiotiques tels que la salinité, la sécheresse, la température élevée etc. (Rai et Nabti, 2017).

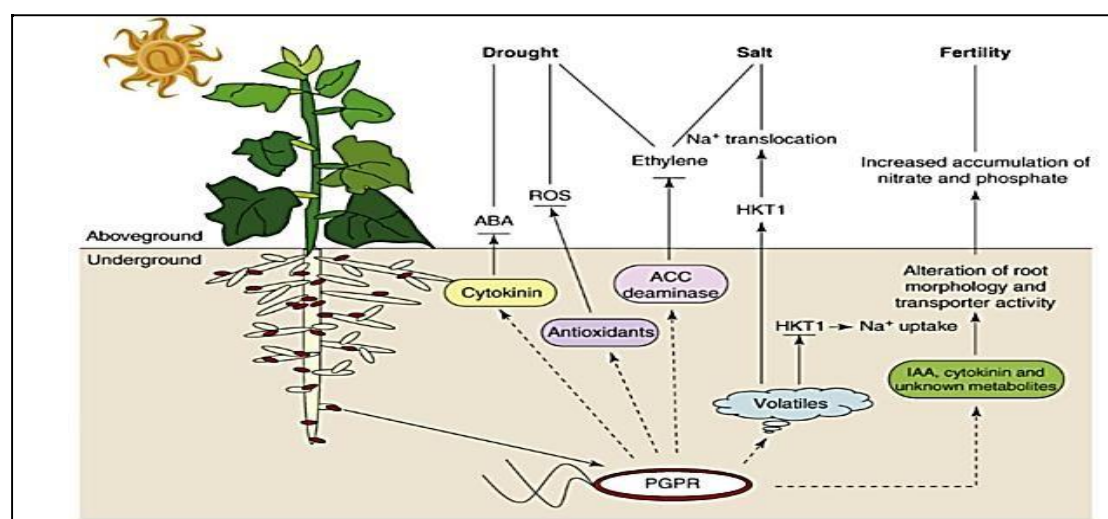


Figure 6. Tolérance Systémique Induite par les PGPR. Les flèches discontinues indiquent les composés bioactifs sécrétés par le PGPR. Les flèches pleines indiquent les composés végétaux affectés par les composants bactériens (Prasad *et al.*, 2015).

1.5. Éthylène et ACC désaminase bactérienne

Certains PGPR sont capables de produire une enzyme, la 1-aminocyclopropane-1-carboxylate désaminase (ACC désaminase), jouant un rôle primordial dans la régulation de la réponse des plantes au stress abiotique, notamment le déséquilibre ionique dû à la sécheresse, la salinité etc. (Saleem *et al.*, 2007). D'après Arshad et Frankenberger (2002), l'éthylène joue un rôle important dans l'initiation et l'allongement des racines, la nodulation, la sénescence, l'abscission et la maturation ainsi que la signalisation des contraintes.

L'éthylène est une hormone végétale jouant un rôle important dans la croissance des plantes. Cependant, un état de stress provoque la synthèse de quantités excessives de cette hormone par les plantes, menant, entre autres, à une défoliation et à d'autres processus cellulaires pouvant réduire les performances et le rendement des cultures.

Le précurseur de synthèse biologique de l'éthylène chez les plantes est l'ACC et, heureusement, les PGPR producteurs d'ACC désaminase sont donc capables de réduire la quantité de ce précurseur en conditions de stress, réduisant ainsi la capacité végétale de synthèse des quantités nocives d'éthylène (Desbrosses *et al.*, 2009). Ce processus microbien permet de rétablir l'équilibre hormonal en éthylène (Figure 7) et assure, par conséquent une bonne santé et un bon rendement de la plante (Ghosh *et al.*, 2003).

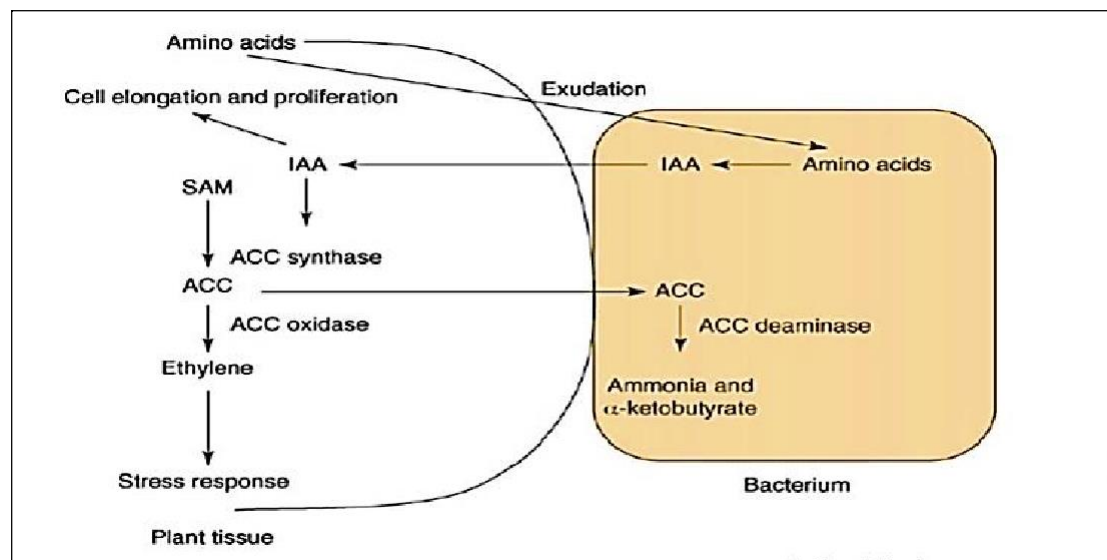


Figure 7. Rôle de l'ACC désaminase bactérien dans la réduction des niveaux de l'éthylène végétal (Glick *et al.*, 1999).

2. Comme agents de lutte biologique

La lutte biologique est considérée comme une voie alternative à l'utilisation des produits chimiques qui constituent un danger sur l'environnement et sur l'homme (Aouar *et al.*, 2019). Certains PGPR sont connus pour leur capacité à produire une large gamme de composés à propriétés antifongiques tels que les sidérophores, les composés volatils toxiques (HCN), les enzymes lytiques, les antibiotiques, etc. D'autres sont capables d'induire, chez la plante, une modification de son état physiologique, conduisant au renforcement de ses défenses vis-à-vis des pathogènes. Ce phénomène est communément connu sous le nom ISR (de l'anglais : Induced Systemic Resistance ; signifiant : Résistance Systémique Induite) (Mezaache-Aichour *et al.*, 2015).

2.1. L'antibiose

L'antibiose est probablement le mécanisme le plus connu et peut-être le plus important utilisé par les PGPR pour limiter l'invasion des cultures agricoles par les pathogènes. Il consiste en une inhibition directe de la croissance du pathogène via la production de métabolites aux propriétés antifongiques et/ou antibiotiques (**Milet, 2017**).

Les antibiotiques des PGPR englobent un groupe chimiquement hétérogène de composés organiques de bas poids moléculaire qui peuvent agir sur les champignons pathogènes des plantes par inhibition de la germination des spores et/ou lyse des mycéliums fongiques (**Whipps, 2001**).

Une souche appartenant au genre *Pseudomonas* produit des antibiotiques comme le 2,4-diacetylphloroglucinol, la pyrrolnitrine, les phenazines et les butyrolactones, ces composés sont connus pour leur fort pouvoir antifongique. D'autre part, les bactéries du genre *Bacillus* produisent une large variété des métabolites antifongiques (la zwittermycine-A, la kanosamine, des lipopeptides des familles de la surfactine, de l'iturine et de la fengycine. Elles peuvent également produire des enzymes hydrolytiques (β -1,3- glucanase) dégradant les parois cellulaires fongiques (**Adam, 2008**).

2.2. Synthèse des sidérophores bactériens

Le fer est un élément nutritif essentiel aussi bien pour les PGPR que les champignons phytopathogènes et les plantes. Certains PGPR ont développé une stratégie d'absorption spécifique de Fer en condition de carence. Elle consiste à sécréter des substances ayant un rôle chélateur du Fer. Ces substances sont appelées, sidérophores (**Lenin et Jayanthi, 2012**).

Les sidérophores (grec : porteur de fer) sont des biomolécules de faibles poids moléculaire, chélatrices du Fe^{3+} . Ce sont de petites molécules peptidiques (400-1000 Da) ayant des chaînes latérales et des groupes fonctionnels avec un ligand pour lier les ions de fer, possédant donc une activité spécifique de transporter du fer disponible au sol sous sa forme (Fe^{3+}) (**Ahmed et Holmstrom, 2010 ; Akhtar et Siddiqui, 2010 ; Sivasakthi et al., 2014**).

Par exclusion compétitive des phytopathogènes, les sidérophores produits par les PGPR contribuent à la protection des plantes des maladies fongiques,

particulièrement en cas de carence en Fer. De plus, certains sidérophores bactériens ont une forte affinité avec des récepteur végétaux, fournissant ainsi le Fer aux cultures agricole ne manque (**Arora et Verma, 2017**). Parmi les bactéries capables d'en produire, celle appartenant aux genres *Bacillus*, *pseudomonas*, *Azotobacter* sont les plus documentées (**Silini, 2013**).

2.3. Colonisation racinaire et compétition pour les nutriments

La colonisation des racines est une condition préalable importante pour que les bactéries soient considérées comme de bons PGPR, et il est communément admis qu'un agent de lutte biologique devrait être capable coloniser la rhizosphère et la surface de la plante qu'elle protège. Cette compétence microbienne permettra à l'agent de lutte persister le plus de temps dans l'espace agricole menacé et d'assurer ainsi sa fonction protectrice (**Labuschagne et al., 2010**).

Dans certains cas, la réduction de la maladie par un PGPR peut être associée à une colonisation importante des racines, réduisant le nombre de sites habitables pour les microorganismes pathogènes et leur croissance (**Cherif, 2014**). Cependant, cette corrélation entre l'importance d'une population de PGPR sur les racines et sa capacité protectrice observée n'est dans certains cas pas vérifiée et ne peut pas être considérée comme une règle générale (**Reyes et al., 2004**). Cependant, un bon PGPR doit être présent sur les racines en nombre suffisant pour avoir un effet bénéfique et être capable d'instaurer une compétition pour les nutriments dans la rhizosphère (**Haas et Defago, 2005**).

Outre la vitesse de croissance intrinsèque, les autres propriétés renforçant le potentiel colonisateur d'un PGPR sont la mobilité (présence d'un flagelle) et le chimiotactisme pour les exsudats racinaires (**Berggren et al., 2001 ; Gupta, 2003 ; Jofre et al., 2004**).

2.4. L'HCN bactérien comme substance antifongique

Le cyanure d'hydrogène (HCN) est un gaz incolore ou bleu pâle avec une légère odeur amère et amande. C'est un composé hautement toxique et volatil qui interfère avec la cellule en inhibant le cytochrome oxydase dans les mitochondries et donc empêche la production d'ATP, et participe à la suppression du pathogène racinaire aérobie (**Shaikh et Sayyed, 2015**).

Pour certain PGPR, l'HCN est un métabolite secondaire dont la glycine est le précurseur. Bien que le cyanure soit un inhibiteur métabolique général, il est synthétisé, excrété et métabolisé par certains organismes dont les bactéries comme un moyen d'éviter la prédation ou la compétition. Les plantes hôtes ne sont généralement pas affectées par le cyanure bactérien. La production de HCN est une activité très commune chez les espèces des genres *Pseudomonas* (88,89%) et *Bacillus* (50%) dans le sol rhizosphériques (Sebihi, 2016).

2.5. Production d'enzymes lytiques

Les enzymes lytiques jouent également un rôle important parmi les traits PGPR impliqués dans la biofertilisation des sols à travers la dégradation de la matière organique. Des enzymes comme les protéases, les lipases, les amylases, les chitinases, les uréases etc. sont souvent recherchés comme caractères de choix afin de sélectionner des PGPR efficaces (Rai *et al.*, 2018).

Une grande variété de microorganismes présente une activité hyperparasitaire, attaquant les agents pathogènes en excrétant des hydrolases de la paroi cellulaire. A titre d'exemple, la chitinase produite par *S. plymuthica* C48 a inhibé la germination des spores et l'élongation du tube germinatif chez *Botrytis cinerea*. La capacité de produire des chitinases extracellulaires est considérée comme cruciale pour que *Serratia marcescens* agisse comme antagoniste contre *Sclerotium rolfsii* et pour *Paenibacillus* sp. souche 300 et *Streptomyces* sp. souche 385 pour supprimer *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum* (Ordentlish *et al.*, 1988 ; Frankowski *et al.*, 2001 ; Chernin *et al.*, 2002).

Il a également été démontré que la chitinase extracellulaire et la laminarinase synthétisées par *Pseudomonas stutzeri* digèrent et lysent les mycéliums de *Fusarium solani*. Bien que l'activité chitinolytique semble moins essentielle pour l'activité antifongique de *S. plymuthica* IC14 lorsqu'elle est utilisée pour supprimer *Sclerotinia sclerotiorum* et *Botrytis cinerea*, les protéases et d'autres traits de contrôle biologique sont fortement impliqués. La β -1,3-glucanase, synthétisée par *Paenibacillus* sp. souche 300 et *Streptomyces* sp. souche 385 est capable de lyser les parois cellulaires fongiques de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum*. *Burkholderia cepacia* synthétise la β -1,3-glucanase qui détruit l'intégrité des parois cellulaires de *Rhizoctonia solani*, *Sclerotium rolfsii* et *Pythium ultimum*. Enfin, il est important de

mentionner que, comme pour les sidérophores et les antibiotiques, la régulation de la production d'enzymes lytiques (protéases et chitinases en particulier) implique les systèmes de régulation GacA / GacS ou GrrA / GrrS (**Compant *et al.*, 2005**).

2.6. La résistance systémique induite (RSI)

Il est largement admis que de nombreux PGPR sont impliqués dans la stimulation de la défense des plantes contre les phytopathogènes (virus, bactéries, champignons et insectes). Ce phénomène est désigné par « résistance systémique induite » (ISR). Des bactéries comme *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Staphylococcus*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Pantoea*, *Burkholderia* et *Alcaligenes* sont capables d'induire une résistance des plantes vis-à-vis des phytopathogènes comme *Fusarium solani*, *F. oxysporum*, *F. culmorum*, *Pythium ultimum*, *Alternaria alternata*, *Botrytis cinerea*, *Phytophthora* etc. (**Jordan *et al.*, 2008 ; Romera *et al.*, 2019**).

Les évènements moléculaires associés à l'ISR sont de mieux en mieux connus. La transmission du signal émis suite à la perception de l'agent infectieux repose sur différentes voies dans lesquelles, des hormones microbiennes et végétales telles que l'acide salicylique, l'acide jasmonique et l'éthylène jouent un rôle crucial (**Glazebrook *et al.*, 2003 ; Nihorimbere *et al.*, 2011**).

Le phénomène de l'ISR peut être divisé en trois étapes principales (figure 8). Ces étapes sont :

- La perception par la plante des molécules bactériennes responsables du phénomène d'élicitation ;
- La transmission du signal nécessaire pour la systématisation du phénomène dans la plante ;
- L'expression des mécanismes de défense qui vont limiter et inhiber la pénétration de pathogène dans les tissus de l'hôte végétal.

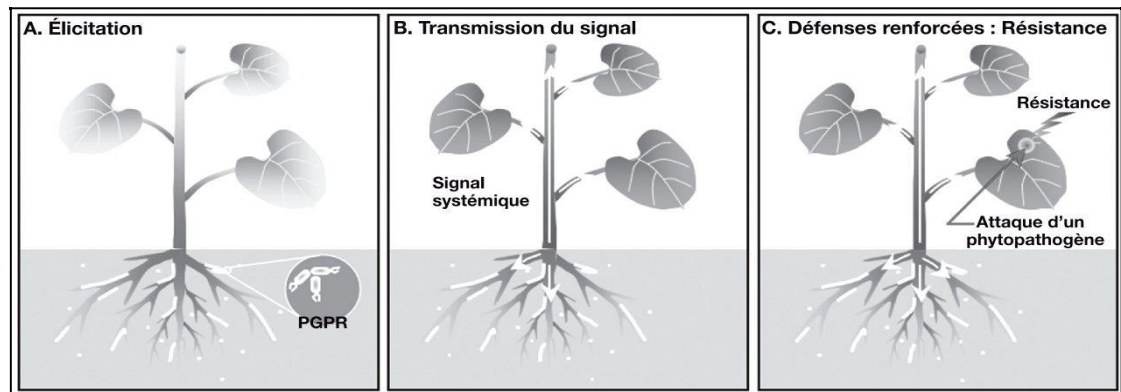


Figure 8. Les étapes de la résistance systémique induite chez les plantes par les PGPR (Jordan *et al.*,2008).

Chapitre II

La pourriture grise de la tomate

La tomate est la culture la plus importante dans le monde. Mais son rendement est affecté par des ravageurs et des champignons phytopathogènes pouvant causer des dégâts sur toutes les parties de la plante. Parmi ces agents pathogènes, *Botrytis Cinerea*, est responsable de la pourriture grise de la tomate et est incriminé à des pertes économiques importantes en matière de rendement final de la tomate dans le monde entier (**Bouaoud et al., 2018**). Ce chapitre représente un petit éclaircissement de l'importance de la tomate comme produit agricole et des dégâts associés à la maladie de la pourriture grise de cette plante.

I. La Tomate « *Solanum lycopersicum* »

La tomate (*Solanum lycopersicum*) représente l'un des légumes les plus consommés au monde (**Antoine et al., 2015**). C'est également l'un des précurseurs les plus importants de l'industrie agroalimentaire (**Ziane, 2018**).

La tomate est originaire des Andes d'Amérique du sud sur une région couvrant la Colombie, le Pérou, la Bolivie et le Chili. Elle fut domestiquée au Mexique, puis introduite en Europe en 1544. Ensuite elle a été propagée en Asie du Sud et de l'Est, en Afrique et au Moyen Orient (**Naika et al., 2005**).

En Algérie, ce sont les cultivateurs du sud de l'Espagne (Tomatros), qui l'ont introduit. Sa consommation a commencé dans la région d'Oran en 1905 puis elle s'entendit vers le centre du littoral algérois et au reste du pays (**Kerroum, 2019**).

Il est important de signaler qu'en Algérie, la pression exercée par les phytopathogènes tels que *Botrytis cinerea*, sur les cultures agricoles, notamment celles de la tomate, mais aussi l'augmentation de la demande, ont obligé le secteur agricole à faire recours à des quantités de plus en plus croissantes d'engrais chimiques. Il est important de mentionner que l'application de fongicides chimiques a augmenté de 1013 à 2005 tons entre l'an 2000 et 2005 (**Bouaoud et al., 2018**).

1. Description botanique de la plante

Solanum lycopersicum est une plante diploïde. Elle possède des racines pivotantes qui poussent à une profondeur de 50 cm et plus. La tige est le port de croissances varié entre érigée et prostrée, pousse à une longueur de 2 à 4m. Elle est pleine, fortement poilue et glandulaire (**Naika et al., 2005**).

Les feuilles sont composées de folioles ovales et peu dentées. Le fruit est une baie plus ou moins grosse, de forme variable (sphérique, oblongue ou allongée) avec des couleurs variées (blanche, rouge, jaune, noire) (**Bénard, 2009**).

Les fleurs sont bisexuées et poussent opposées aux- ou entre les feuilles. Le tube du calice est court et velu et les sépales sont persistants, jaunes et courbés lorsqu'elles sont mûres. Les fleurs possèdent 6 étamines et les anthères ont une couleur jaune vif et entourent le style qui a une extrémité stérile allongée. L'ovaire est supère avec entre 2 et 9 carpelles (**Naika et al., 2005**).

En général la plante est autogame, mais la fécondation croisée peut avoir lieu. Alors que les graines sont nombreuses, poilues, beiges, de 3 à 5 mm de long et 2 à 4 mm de large. L'embryon est enroulé dans l'albumen (**Naika et al., 2005**).

2. Taxonomie

- Règne : Plantae
- Sous règne : *Trachenobionta*
- Division : *Magnoliophyta*
- Classe : Magnoliopsida
- Sous classe : *Asteriadae*
- Ordre : *Solanales*
- Famille : *Solanaceae*
- Genre : *Solanum*
- Espèce : *lycopersicon* (**Toundou, 2015**).

3. Valeur nutritionnelle

La tomate est la deuxième culture de solanacées après la pomme de terre, avec une production annuelle de 1,68 mt, dont 30 millions sont destinés à la transformation. Selon les données de la FAO (2006) la production algérienne représente uniquement 1% de la production mondiale. Le tableau ci-dessous récapitule la valeur nutritionnelle de la tomate selon (**Aissat, 2008**).

Tableau 1. Valeur nutritionnelle moyenne pour 100g de tomate crue

Composition	Valeur dans 100g
Eau	94.5mg
Valeur calorique	18kals
Protide	0.9 mg
Glucide	2.8 mg
Lipide	0.2 mg
Provitamine A	0.38 mg
Vitamine B1	0.06 mg
Vitamine B2	0.04 mg
Vitamine B6	0.11 mg
Vitamine C	15 mg
Vitamine pp	0.7mg
Fer	0.4 mg
Calcium	10 mg
Magnésium	10 mg
Phosphore	24 mg
Potassium	280 mg
Sodium	1.2 mg
Fibre	Riche

II. La pourriture grise de la tomate

1. Les maladies fongiques de la tomate

Les champignons sont les principaux micro-organismes pathogènes des plantes. Ils sont responsables d'épidémies dévastatrices pour les cultures depuis la naissance de l'agriculture (**Martin et Lebrun, 2009**). Ce sont des microorganismes hétérotrophes filamenteux et immobiles, dont la structure cellulaire est celle d'une cellule eucaryote classique (**Nicklin *et al.*, 2000**). La plupart des champignons phytopathogènes possèdent deux modalités de reproduction : asexuée (dite « imparfaite » ou végétative et sexuée « parfaite ») (**Lepoivre, 2003**). Les champignons appartenant aux genres *Botrytis*, *Fusarium*, *Phytophthora*, *Colletotrichum*,

Verticillium, et *Alternaria* sont dans la première lignes des phytopathogènes de la tomate (Naika *et al.*, 2005 ; Causse *et al.*, 2000 ; Zahir *et al.*, 2018). Seule la maladie de la tomate causée par *B. cinerea* est détaillée ci-dessous.

2. *Botrytis cinerea*

Botrytis Cinerea est un champignon nécrotrophique de grande adaptabilité à différents environnements et hôtes. Il infecte les parties aériennes de la tomate, où l'infection de tige peut tuer la plante entière (González-Fernández *et al.*, 2005). L'étymologie de son nom fait référence directement à sa morphologie : « *Botrytis* » signifiant « en forme de grappe » et indiquant ainsi la morphologie des conidiophores, et « *cinerea* » renvoie à la couleur grise cendrée de la sporulation (Walker, 2013).

C'est un agent responsable de la pourriture grise qui est l'une des maladies les plus dommageables de la tomate à travers le monde et qui provoque des pertes de rendement substantielles (Bouaoud *et al.*, 2018).

La figure 09 montre l'aspect de la culture d'une souche de *B. cinerea* sur un milieu de culture PDA (Pomme de terre, Dextrose, Agar) :

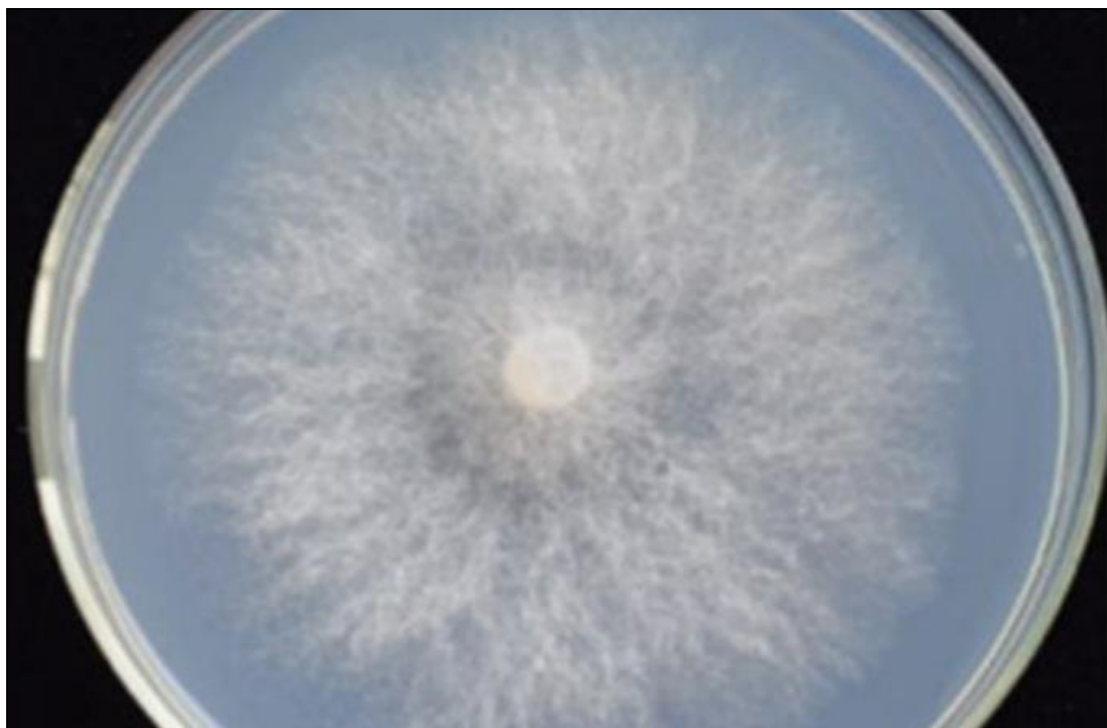


Figure 9. Aspect de la culture d'une souche de *B. cinerea* sur un milieu de culture PDA (Sarven *et al.*, 2020).

2.1. Taxonomie

Selon **Walker (2013)** :

- Règne : *Fungi*
- Division : *Ascomycota*
- Classe : *Leotimycetes*
- Ordre : *Helotiales*
- Famille : *Sclerotiniaceae*
- Genre : *Botrytis*

2.2. Cycle de développement

Au cours de son cycle biologique, *B. cinerea* peut produire un mycélium, des spores asexuées ou conidies, des spores sexuées ainsi que des sclérotés. Durant l'hiver, *B. cinerea* se conserve principalement sous forme de sclérotés dans les débris morts de l'hôte et généralement les feuilles tombées au sol. Les sclérotés, dans des conditions favorables, se développent en apothécies donnant des ascospores. Ces apothécies constituent aussi une forme de dissémination du champignon (figure 10) (**Ajouz, 2009**).

Les sclérotés peuvent également germer pour produire un mycélium à filaments articulés, grisâtres ou olivâtres, cylindriques, quelquefois vésiculeux au niveau de la cloison médiane qui, grâce à ses appressoriums, perforera la cuticule végétale. Par la suite, des conidiospores portant des macroconidies (spores asexuées) se développent. Ils serviront d'inoculum primaire. Les macroconidies libérées seront propagées par le vent et de la pluie, ce qui sera considéré d'inoculum secondaire. Le mycélium de *B. Cinerea* peut aussi se conserver dans les débris de l'hôte durant l'hiver pour produire des conidies et servir d'inoculum primaire quand les conditions deviennent favorables (figure 10) (**Williamson et al., 2007**).

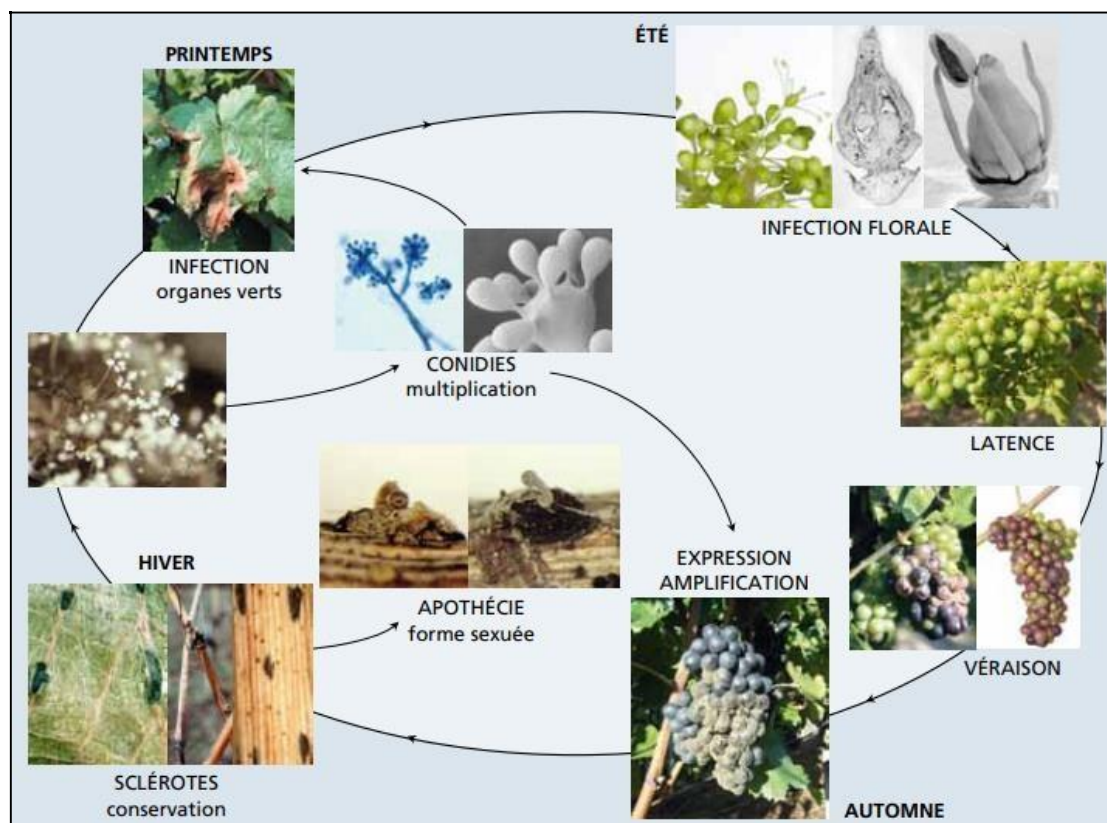


Figure 10. Cycle de développement de *B. cinerea* (Viret *et al.*, 2010).

2.3. La pourriture grise de la tomate causée par le *Botrytis Cinerea*

B. Cinerea est dans la 3^{ème} ligne des maladies des maladies fongiques, après le mildiou et l'oïdium, en matière de pertes économique associées (Walker, 2013). La pourriture grise de la tomate est l'une des maladies les plus dévastatrices de la tomate cultivée sous serres. Son développement, rapide et insidieux, engendre chaque année la destruction des cultures pendant le stade de croissance, ainsi que la détérioration des fruits pendant le transport et le stockage (El Oirdi, 2009).

Les symptômes les plus typiques pour les feuilles et les fruits sont l'apparition de taches brunes, suivis par l'apparition de feutrage grisâtre, qui sont en fait les conidies (Williamson *et al.*, 2007). Les figures 11, 12 et 13 montrent l'effet de l'infection due à *B. cinerea* sur les feuilles, les fruits et les parties aériennes de la tomate respectivement.



Figure 11. Effet de *B. cinerea* sur des feuilles détachées de la tomate (Sarven *et al.*, 2020).

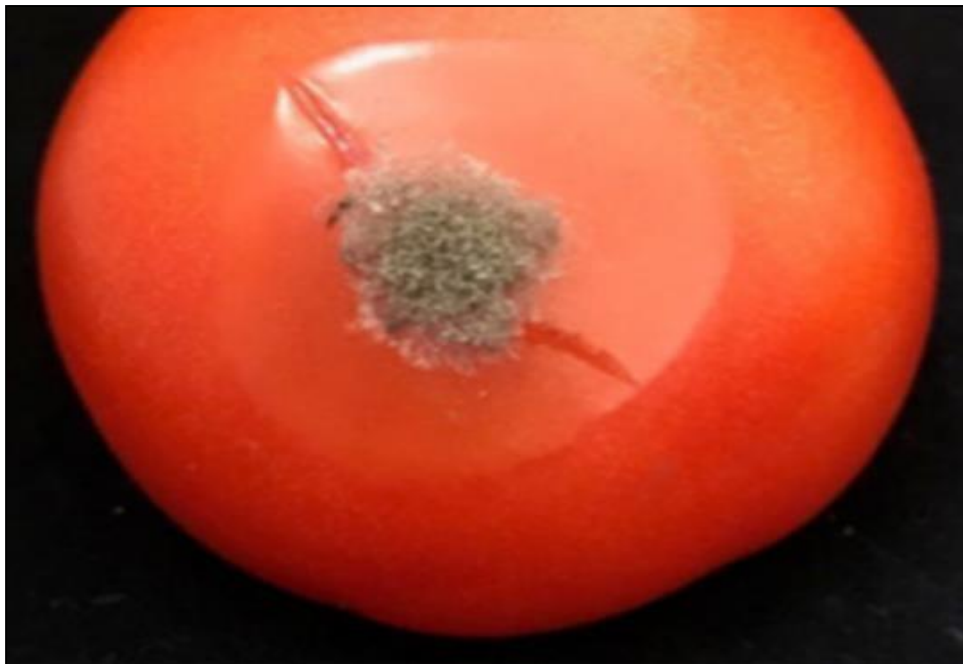


Figure 12. Effet de *B. cinerea* sur le fruit de la tomate (Sarven *et al.*, 2020).



Figure 13. Effet de *B. cinerea* sur la partie aérienne d'une plante de tomate (Sarven *et al.*, 2020).

Chapitre III

Avancées et Perspectives

I. Avancées

En 2006, Lee *et al.* ont publié un travail intéressant, dans lequel ils évaluent la capacité des bactéries du genre *Bacillus* comme agent de lutte biologique contre *B. cinerea* sur plante de tomate. Pour ceci, diverses formulations d'une souche, *Bacillus licheniformis* N1, ont été développées en utilisant des cultures en fermentation. La capacité des différentes formulations à contrôler la moisissure grise sur les plantes de tomates a été évaluée. Parmi les différentes formulations utilisées, celle nommée N1E, à base d'amidon de maïs et d'huile d'olive, mélangé avec l'agent de lutte, a été utilisée dans des expériences d'infection artificielle sous serre.

La formulation N1E, diluée 100fois, s'est avérée être la formulation optimale à pulvériser comme biofongicide. Les expériences d'infection artificielle sous serre et les expériences d'infection naturelle dans des conditions de production ont révélé que le N1E réduisait considérablement les symptômes de la maladie (90.5% de réduction des symptômes par rapport à 77% de réduction par le fongicide chimique : carbendazime et de diéthofencarbe). Le traitement N1E avait également une activité de promotion de la croissance, ce qui montrait un nombre accru de fruits obtenus tomates par rapport aux traitements (fongicide chimique et plantes sans traitement). Cette étude suggère que la formulation à base d'amidon de maïs et de *B. licheniformis*, développée en utilisant la fermentation liquide sera un outil efficace dans le contrôle biologique de la moisissure grise de la tomate (Lee *et al.*, 2006).

En 2011, Berrada *et al.* ont établi une procédure expérimentale de sélection de bactéries halophiles dans le but de les utiliser comme agents de lutte biologique contre la pourriture grise des fruits de la tomate en stock (maladie post-récolte). Pour cela, 15 bactéries halophiles ont été évaluées pour leur activité antagoniste contre *B. cinerea* : 11 souches Gram positives attribuées aux genres *Bacillus* (9), *Jeotgalibacillus* (1) et *Planococcus* (1) et quatre souches Gram négatives attribuées aux genres *Salinivibrio* (1), *Vibrio* (2) et *Photobacterium* (1). Lors du dépistage *in vitro*, 12 isolats antifongiques ont sécrété des composés antifongiques diffusibles, des enzymes hydrolytiques ou des composés volatils à activité antagoniste. Le criblage *in vivo* des isolats, *Bacillus safensis* CCMM B582 et *Bacillus oceanisediminis* CCMM B584 a montré une activité antagoniste permanente sur les fruits de tomate, avec une inhibition à 100% de *B. cinerea* après 7 jours de contact.

L'utilisation des traits comme l'activité antagoniste *in vitro*, la production de composés antifongiques diffusibles, des enzymes hydrolytiques ou des composés volatils à activité antagoniste a constitué selon **Berrada et al. (2011)**, un bon moyen de screening de bactéries à potentiel protecteur des fruits de tomate en conservation.

Des souches du genre bactérien *Micromonospora* ont été isolées par **Martínez-Hidalgo et al. (2015)** à partir des nodules de luzerne stérilisés en surface. Les souches ont montré une activité antifongique *in vitro* contre plusieurs champignons pathogènes. L'inoculation des racines de la tomate avec les *Micromonospora* isolées a significativement réduit l'infection des feuilles par *Botrytis cinerea*, malgré la séparation spatiale entre les deux micro-organismes.

Cette résistance systémique induite, confirmée dans différents cultivars de tomates, est durable. Les analyses de l'expression génique ont montré que *Micromonospora* stimule la capacité de la plante à activer des mécanismes de défense lors d'une attaque pathogène. La réponse défensive des plants de tomates inoculées avec *Micromonospora* spp. diffère de celle des plantes non inoculées, montrant une plus forte induction des défenses qui, selon **Martínez-Hidalgo et al. (2015)**, sont régulées par l'AJ lorsque la plante est confrontée à un pathogène.

Cette hypothèse a été confirmée en utilisant des mutants de tomate déficients en JA (def1). Ces derniers sont incapables d'afficher une résistance induite à long terme après inoculation par *Micromonospora* spp. En conclusion l'inoculation par des souches de *Micromonospora* utilisées dans ce travail peuvent être considérées comme candidats d'agents de lutte biologique contre la pourriture de la tomate, combinant à la fois une activité antifongique directe contre *Botrytis cinerea* et régulant l'expression des phytohormones impliquées dans la défense des plantes (**Martínez-Hidalgo et al., 2015**).

Un travail intéressant a été réalisé par **Bouaoud et al. (2018)**, dans lequel une approche multicritère pour la sélection d'agents de lutte biologique efficaces contre *Botrytis cinerea*, agent de la pourriture grise de la tomate, a été mise en œuvre. En résumé, 121 souches bactériennes ont été collectées à partir de la rhizosphère/phylosphère des plantes de cultivées sous serres au niveau de la région de Bejaia. Au total, 37 souches ont été sélectionnées en fonction de leur capacité d'inhibition de la croissance mycélienne de *B. cinerea* à travers des tests

d'affrontement en culture. Ces souches ont été identifiées celles qui correspondaient à des agents potentiellement pathogènes pour les mammifères ont été écartées.

A la fin, trois souches ont été sélectionnées parmi celle appartenant au genre *Pseudomonas* pour leur efficacité protectrice significative contre *B. cinerea* sur tomate, leur capacité à croître à 15-25 ° C et leur incapacité à croître à 37 ° C. Ces trois souches réduisaient significativement le développement de la lésion nécrotique et la sporulation de *B. cinerea* d'une manière dose-dépendante (**Bouaoud et al., 2018**).

La stratégie suivie par Bouaoud et ses collègues consistait à sélectionner des bactéries préalablement adaptées aux plantes de tomate déjà infectées par le champignon pathogène et donc, ayant plus de chance de survie et d'efficacité comme agent de lutte. La compétence microbienne d'un PGPR est donc un critère primordial pour assurer la survie et l'efficacité du microorganisme sur terrain. De plus, la capacité bactérienne à inhiber la croissance fongique *in vitro* et *in vivo* a été choisie comme critère de sélection des souches potentiellement efficaces comme agents de lutte biologique contre la pourriture grise de la tomate.

La capacité de la souche *Pseudomonas* QBA5 à inhiber la pourriture grise des fruits et des feuilles de la tomate, et les mécanismes qui lui sont associés, ont été évalués par **Gao et al. (2018)**. Contrairement à **Bouaoud et al. (2018)**, leur stratégie consistait à choisir des souches adaptées à des plantes de tomate en bonne santé. L'objectif en est d'augmenter la chance de rencontre avec des souches autochtones plus ou moins impliquées dans la bonne situation des plantes de tomate. La souche QBA5 a été sélectionnée sur la base de sa capacité à inhiber (in vitro) la germination des spores et la croissance mycélienne du champignon *B. cinerea*. La souche a également montré un fort potentiel protecteur des fruits et des plantes de tomate. Les mécanismes associés à ce pouvoir protecteur ont été associés à la capacité de la souche à produire des perforations au niveau de la membrane des spores fongiques. De plus, 5 molécules à activités antifongiques ont été séparées par HPLC à partir du surnageant de la culture bactérienne (**Gao et al., 2018**).

Plus récemment, **Toral et al. (2020)** ont évalué la capacité d'une souche appartenant au genre *Bacillus* (*Bacillus velezensis* XT1) à protéger les plantes de tomate contre *B. cinerea*. L'application de la bactérie réduisait les paramètres d'infection tels que l'incidence et la gravité de la maladie (50% et 60%,

respectivement). Les paramètres de stress et la teneur en phytohormones ont été évalués afin de déterminer la capacité de XT1 à activer le système de défense par régulation phytohormonale. La teneur en H₂O₂ et en malondialdéhyde (MDA) était plus faible chez les plantes traitées avec XT1 et infectées par *B. cinerea* que chez les plantes non traitées avec la souche. Le traitement par XT1 a également induit un dépôt de callose, augmentant ainsi les défenses physiques contre l'infection.

Les résultats de cette étude suggèrent que les voies de signalisation et d'activation impliquées dans les mécanismes de défense sont activées par l'acide jasmonique (JA) et l'éthylène, qui sont des phytohormones dont la régulation est induite par le traitement préventif avec XT1. L'étude montre également le potentiel de la souche XT1 comme inductrice de la résistance chez la tomate grâce à une régulation phytohormonale (**Toral et al., 2020**).

Ces avancées ne représentent qu'une simple fraction des avancées réalisées dans le domaine de la recherche des PGPR à utiliser comme agents de lutte biologique, visant à protéger la tomate contre les attaques du pathogène *B. cinerea* durant les 15 dernières années. Le tableau ci-dessous représente une récapitulation de travaux plus récents sur le même objectif susmentionné.

Tableau 2. Récapitulation des travaux récents dans le domaine de la lutte biologique contre *B. cinerea* sur plante de tomate :

Référence	Bactérie (s) utilisée (s)	Effet
(Gao et al., 2018)	• <i>Pseudomonas</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Inhibition de : <ol style="list-style-type: none"> 1. La germination des conidies 2. L'élongation de tube germinatif 3. La Croissance mycélienne du <i>B. cinerea</i> • Efficacité préventive significative contre la moisissure grise sur les fruits et les plantes de la tomate
(Toral et al., 2020)	• <i>Bacillus velezensis</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Augmente la biomasse totale de la plante • Réduit les paramètres d'infection tels que

		<p>l'incidence et gravité de la maladie de 50% et 60%.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Active le système de défense. • Réduit les dommages : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Oxydatifs ➤ H₂O₂ ➤ Malondialdéhyde • Induit le dépôt de callose. • Augmente la réponse à une infection pathogène. • Régulation hormonale.
(Salvatierra <i>et al.</i> , 2018)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduit de manière significative la gravité de l'infection. • Promotion de la croissance des plantes de tomates. • Production de : <ul style="list-style-type: none"> ➤ IAA ➤ 2,3-butanediol • Effet d'antagonisme direct contre <i>B. cinerea</i> • Induction de la résistance chez la plante. • Maintient une densité de population plus élevée au fil du temps sur les feuilles de la tomate.
(Wang <i>et al.</i> , 2018)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bacillus subtilis</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Inhibe la croissance mycélienne à 95,20% • Efficacité de contrôle de la moisissure grise de la tomate et la moisissure des feuilles à 74,70 et 72,07%, respectivement. • Stimule la germination des graines et la croissance des plantules de la tomate. • Augmente le taux de germination et la longueur de la racine • Indices physiologiques plus élevés par rapport aux témoins.
(Toral <i>et al.</i> , 2018)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bacillus methylotrophicus</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Inhibe la croissance fongique • Efficacité contre l'infection par <i>B. cinerea</i> • Déclenche l'activité antioxydante des fruits.

(Rojas et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pseudomonas stutzeri</i> • <i>Stenotrophomonas maltophilia</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Antagoniste contre <i>B. cinerea</i> • Promotion de : <ul style="list-style-type: none"> ➤ La longueur des plantules et des racines. ➤ La teneur en chlorophylle ➤ Le poids frais total des plantes de tomate.
(Ni li et al., 2019)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bacillus subtilis</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Améliore la croissance • Réduit l'incidence et la gravité des maladies • Forte activité antagoniste contre la croissance mycélienne
(Kim et al., 2019)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Paenibacillus</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité antifongique contre <i>B. Cinerea</i> • Production des sidérophores • Production des chitinases, lipases et protéase. • Inhibition de la germination des conidies.
(Chen et al., 2019)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> • <i>Bacillus licheniformis</i> • <i>Bacillus subtilis</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Inhibition de <i>Botrytis cinerea</i> sur plante de tomate. • Production de composés volatiles. • Synthèse d'enzymes lytiques et de sidérophores • Colonisation des fruits et protection durable

II. Lecture critique et perspectives

Le nombre des travaux visant l'isolement et la sélection des PGPR à des fins de biolutte augmente sans cesse. L'importance mondiale de la tomate comme produit agricole et les dégâts sans précédents, constatés sur l'environnement suite aux activités agricoles utilisant des produits chimiques nocifs comme engrais, pesticides, fongicides etc., a obligé les scientifiques et les agriculteurs de se tourner vers une quête de recherche de bactéries bénéfiques pouvant remplacer le rôle des produits chimiques en agriculture.

Bien que les PGPR soient principalement signalés comme agents de lutte en laboratoire ou sous serre, nous manquons toujours d'informations sur leurs

interactions avec les plantes et les autres micro-organismes une fois sur champ, ce qui est certainement un environnement plus complexe.

Progressivement, et avec une connaissance croissante des aspects d'interaction entre les plantes, les bactéries et leur environnement commun (sol), mais aussi la compréhension des molécules-sigaux clés impliquées dans de telles interactions, les PGPR ont commencé à occuper une place incontestable en agriculture moderne en tant qu'agents de lutte biologique. Cependant, des travaux expérimentaux doivent être menés pour mieux comprendre certains problèmes liés à la stabilité et à l'efficacité durable de l'inoculum sur terrain, à ses conditions de stockage, de transport et de livraison, mais aussi à son effet à long terme sur son nouvel environnement.

De plus, il est essentiel d'incorporer plus de données sur l'impact de l'expansion de l'aridité et du réchauffement climatique dans le monde sur la composition du sol et la diversité microbienne et végétale afin de comprendre et orienter les résultats déjà obtenus pour une meilleure application des PGPR.

La biolutte utilisant les PGPR manque, jusqu'à nos jours, de protocoles efficaces permettant un meilleur isolement et une meilleure sélection des candidats futurs de bactéries pouvant être utilisées comme biofongicides en toute sécurité. En effet, la plupart des données susmentionnées ignorent la question de pathogénicité des souches utilisées vis-à-vis de l'être humain et de l'animal. La sécurité des PGPR pour la santé des consommateurs est un sujet qui doit donc occuper plus d'espace dans les travaux scientifiques s'intéressant à ce domaine de recherche.

Conclusion

Conclusion

Récemment, l'application des PGPR comme agent de lutte biologique a reçu une attention considérable pour ses avantages économique et écologique. Des bactéries comme celles appartenant aux genres *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Arthrobacter*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, etc. ont prouvé leur efficacité en tant que promoteurs de croissance des plantes, agents de biolutte et restaurateurs de la qualité du sol dans différents environnements. Cependant, nous manquons toujours d'informations sur leurs interactions avec les plantes et les autres micro-organismes une fois sur champ, ce qui est certainement un environnement plus complexe que le laboratoire et les serres.

Progressivement, et avec une connaissance croissante des aspects d'interactions entre les plantes, les bactéries et leur environnement commun (sol), mais aussi la compréhension des molécules-signaux clés impliquées dans de telles interactions, les PGPR ont commencé à occuper une place incontestable en agriculture moderne en tant qu'agent de lutte biologique. Néanmoins, plus de travaux doivent être menés pour mieux comprendre certains problèmes liés à la stabilité et à l'efficacité à long terme de l'inoculum sur le terrain, à ses conditions de stockage, de transport et de livraison, mais aussi à son effet à long terme sur son nouvel environnement.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- Adam, K.** (2008). Elicitation de la résistance systémique induite chez la tomate et le concombre et activation de la voie de la lipoxygénase par des rhizobactéries non- pathogènes. Thèse doctorat de l'Université de Liège, Belgique, pp. 9.
- Afzal, I., Shinwari, Z.K. et Iqrar, I.** (2015). Selective isolation and characterization of agriculturally beneficial endophytic bacteria from wild hemp using canola. *Pak. J. Bot.* 47 (5), 1999-2008.
- Ahemad, M. et Khan, M.S.** (2011). Functional aspects of plant growth promoting rhizobacteria: recent advancements. *Insight. Microbiol.* 1 (3), 39-54
- Ahemad, M. et Kibret, M.** (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. *J. King Saud. Univ. Sci.* 26 (1), 1-20.
- Ahmed, E. et Holmström, S.J.M.** (2014). Siderophores in environmental research : roles and application. *Microbiol. Biotechnol.* 7 (3), 196-208.
- Aissat, K.** (2008). Etat sanitaire de la culture de la tomate sous serre et étude épidémiologique de *Botrytis cinerea* (Agent de la pourriture grise). Thèse doctorat de l'université Ferhat Abbas-Setif, pp. 9-10.
- Ajouz, S.** (2009). Estimation du potentiel de résistance de *Botrytis cinerea* à des biofongicides. Thèse doctorat de l'université d'Avignon et des pays de vaucluse, pp. 5.
- Akhtar, M. S. et Siddiqui, Z.A.** (2010). Role of plant growth promoting rhizobacteria in biocontrol of plant diseases and Sustainable agriculture, in : Maheshwari. D.K.(Ed.), plant growth and health promoting bacteria. Spinger., Berlin Heidelberg, pp.157-195.
- Akiyoshi, D.E, Regier, D.A. et Gordon, M.P.** (1987). Cytokinin production by *Agrobacterium* and *Pseudomonas ssp.* *J. Bacteriol.* 169 (9), 4242-4248.
- Alabouvette, C. et Cordier, C.** (2018). Fertilité biologique des sols : des microorganismes utiles à la croissance des plantes. *Innovation Agronomiques.* 69, 61-70.

- Antoine, B.B., Hilaire, K.T., Koffi, K.G., Fernand, K., Seydou, T., Mamadou, C., Bomisso, L. et Daouda, K.** (2015). Inhibition de *Sclerotium rolfsii* Sacc. (Corticaceae), agent causal de la pourriture du collet de la tige de la tomate (*Solanaceae*), par *Xylopla aethiopica* (Dunal) a. rich (*Annonaceae*) et *Trichoderma sp.* Eur. J. Sci. 11 (12), 61-85.
- Aouar, L.** (2012). Isolement et identification des actinomycètes antagonistes des microorganismes phytopathogènes. Thèse doctorat Université de Constantine, pp 7-8.
- Aouar, L., Boukelloul, I., Benadjila, A.R., Medjoudj, H. et Zaabat, M.** (2019). *Streptomyces Griseus* LAC1 : Biocontrol et propriétés promotrices de la croissance des plantes. 9 (1), 27-37.
- Arif, F.** (2015). Effets du stress salin et d'osmoprotecteur naturels sur la germination de blé dur (*Triticum durum*) inoculé par *Pseudomonas fluorescens*. Thèse doctorat de l'université Ferhat Abbas -Sétif, pp7.
- Arora, N.K. et Verm, M.** (2017). Modified microplate method for rapid and efficient estimation of siderophore produced by bacteria. 3 Biotech. 7 (6), 381.
- Arora, N.K., Tewari, S., Singh, S., Lal, N. et Maheshwari, D.K.** (2012). PGPR for protection of plant health under saline conditions, in : Maheshwari, D. K (Ed.), Bacteria in agrobiolgy: stress management. Springer., Berlin, pp. 239-258.
- Arshad, M. et Frankenberger, W.T.** (2002). Ethylene in plant physiology, in : Arshad, M., et al. (Eds.), Ethylene. Springer., Boston, pp. 11-50.
- Backer, R., Rokem, J.S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E. et Smith, D.L.** (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. Front. Plant. Sci. 9, 1473.
- Bakthavatchalu, S., Shivakumar, S. et Shanker, S.B.** (2012). Identification of multi-trait PGPR isolates and evaluation of their potential as biocontrol agents. Acta Biol. Indica. 1 (1), 61-67.

- Bal, H.B., Das, S., Dangar, T.K. et Adhya, T.K.** (2013). ACC deaminase and IAA producing growth promoting bacteria from the rhizosphere soil of tropical rice plants. *J. Microbiol.* 53 (12), 972-984.
- 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 doctorat d'UMR 1121 Nancy Université – INRA, pp 17.
- Beneduzi, A., Ambrosini, A. et Passaglia, L.M.P.** (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) : Their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genet. Mol. Biol.* 35 (4), 1044-1051.
- Benmati, M.** (2014). PGPR, paranodules, stimulation de la croissance et tolérance au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) : Aspects moléculaires et génétiques. Thèse doctorat de l'université Constantine, pp. 46.
- Berggren, I., van Vuurde, J.W.L. et Martensson, A.M.** (2001). Factors influencing the effect of deleterious *Pseudomonas putida* rhizobacteria on initial infection of pea roots by *Rhizobium leguminosarum* bv. viceae. *Appl. Soil. Ecol.* 17 (2), 97-106.
- Berrada, I., Benkhemmar, O., Swings, J., Bendaou, N. et Amar, M.** (2012). Selection of halophilic bacteria for biological control of tomato gray mould caused by *Botrytis cinerea*. *Phytopathologia Mediterranea.* 51 (3), 625-630.
- Bhattacharyya, P.N. et Jha, D.K.** (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 28 (4), 1327-1350.
- Biosevert, K.** (2014). Évaluation du déplacement de modèles d'endophytes dans le MAÏS et de leur effet sur la photosynthèse. Mémoire de la maîtrise en biologie cellulaire et moléculaire. Université du Québec, pp 3.
- Bottini, R., Fulchieri, M., Pearce, D. et Pharis, R.P.** (1989). Identification of gibberellins A1, A3, and iso-A3 in cultures of *Azospirillum lipoferum*. *Plant Physiol.* 90(1), 45-47.

- Bouaoud, Y., Troulet, C., Aissat, K. et Bardin, M.** (2018). Diversity in the susceptibility of *Botrytis cinerea* strains to the biological control agent *Pseudomonas helmanticensis*. 133, 100-104.
- Bouaoud, Y., Troulet, C., Foughalia, A., Berge, O., Aissat, K. et Bardin, M.** (2018). A multi-criteria approach for the selection of efficient biocontrol agents against *Botrytis cinerea* on tomato in Algeria. *BioControl*. 63 (2), 299-311.
- Causse, M., Cranta, C., Saliba-Colombani, V., Moretti, A., Damidaux, R. et Rousselle, P.** (2000). Valorisation des ressources génétique de la tomate par l'utilisation de marqueurs moléculaire. *Cahiers agriculture*. 9, 197-210.
- Chaiharn, M. et Lumyong, S.** (2009). Phosphate solubilization potential and stress tolerance of rhizobacteria from rice soil in Northern Thailand. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 25 (2), 305-314
- Chen, J.H.** (2006). The combined use of chemical and organic fertilizers AND/OR biofertilizer for crop growth and soil fertility. *Int. workshop on sustained management of the soil-rhizosphere system for efficient crop production and fertilizer use*. 16 (20), 1-11.
- Chen, X., Wang, Y., Gao, Y., Gao, T. et Zhang, D.** (2019). Inhibitory abilities of *Bacillus* isolates and their culture filtrates against the gray mold caused by *Botrytis cinerea* on postharvest fruit. *J. Plant. Pathol.* 35 (5), 425.
- Cherif, H.** (2014). Amélioration de la croissance du blé dur en milieu salin par inoculation avec *Bacillus* sp. et *Pantoea agglomerans* isolées de sols arides. Thèse doctorat de l'Université de Sétif, pp 19-30.
- Chernin, L. et Chet, I.** (2002). Microbial enzymes in biocontrol of plant pathogens and pests, in : Burns, R.G. Dick.R.P (Eds.), *enzymes in the environment: activity, ecology, and applications*. Marcel Dekker, New York, N.Y, pp. 171–225.
- Chibani, H.R.** (2017). Sélection et caractérisation des bactéries solubilisant le phosphate isolées du sol salin dans l'ouest algérien : effet sur la promotion de la croissance du blé (*triticum* sp.). Thèse doctorat de l'université de Mostaganem, pp. 6.

- Compant, S., Duffy, B., Nowak, J., Clément, C. et Barka, E.A.** (2005). Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. *Appl. Environ. Microbiol.* 71 (9), 4951-4959.
- Conard, K., Bettin, D. et Neumann, S.** (1992). The cytokinin production of *Azospirillum* and *klebsiella* and its possible ecological effects, in : kaminet. M, Mok. D.W, Zazimalova. E. (Eds.), physiology and biochemistry of cytokins in plants. SPB academic publishing BV, The Hague, The netherlands, pp. 401-404.
- Cortleven, A. et Schmölling, T.** (2015). Regulation of chloroplast development and function by cytokinin. *J. Experim. Botany.* 66 (16), 4999-5013.
- Davies, P.J.** (2010). The plant hormones: their nature, occurrence, and functions, in : Davies, P.J. (Ed.), Plant hormones. Springer., Dordrech, pp. 1-15.
- Desbrosses, G., Contesto, C., Varoquaux, F., Galland, M. et Touraine, B.** (2009). PGPR-Arabidopsis interactions is a useful system to study signaling pathways involved in plant developmental control. *Plant Signaling et Behavior.* 4 (4), 319-321.
- Djabali, N. et Khelili, K.** (2009). Contribution à l'étude de l'impact d'un fongicide (Dithiocarbamate de manganèse : Manèbe) sur quelques paramètres de la fertilité masculine chez le lapin : *Oryctolagus cuniculus*. *Afr. Sci.* 5 (2), 321-329.
- Donderski, W. et Gluchowska, M.** (2000). Production of Cytokinin –like substances by *planktonic* bacteria isolated from lake Jeziorak. *Polish. J. Environ studies.* 9 (5), 369-376.
- Dorais, M., Demers, D.A. et Papadopoulos, A. P.** (2007). Yield and russetting of greenhouse tomato as influenced by leaf-to-fruit ratio and relative humidity. *Hort. Sci.* 42 (3), 503-507.
- El Oirdi, M.** (2009). Facteurs qui contrôlent le pouvoir pathogène chez *Botrytis Cinerea*. Thèse doctorat de l'université SHERBOOKE, pp 47.

- Frankowski, J., Lorito, M., Scala, F., Schmidt, R., Berg, G. et Bahl, H.** (2001). Purification and properties of two chitinolytic enzymes of *Serratia plymuthica* HRO-C48. Arch. Microbiol. 176 (6), 421–426.
- Gao, P., Qin, J., Li, D. et Zhou, S.** (2018). Inhibitory effect and possible mechanism of a *Pseudomonas strain* QBA5 against gray mold on tomato leaves and fruits caused by *Botrytis cinerea*. PloS one. 13 (1).
- Ghosh, S., Penterman, J. N., Little, R. D., Chavez, R. et Glick, B.R.** (2003). Three newly isolated plant growth-promoting bacilli facilitate the seedling growth of canola, *Brassica campestris*. Plant Physiol. Biochem. 41 (3), 277-281.
- Glazebrook, J., Chen, W., Estes, B., Chang, H.S., Nawrath, C., Metraux, J.P., Zhu, T. et Katagiri, F.** (2003). Topology of the network integrating salicylate and jasmonate signal transduction derived from global expression phenotyping. Plant. J. 31, 217-228.
- Glick, B.R.** (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. Microbiol. Res. 169 (1), 30-39.
- Glick, B.R.** (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. Sci. vol 2012.
- Glick, B.R.** (2015). Biocontrol Mechanisms, in: Glick, B.R. (Ed.), Beneficial Plant-Bacterial Interactions. Springer., Switzerland, pp. 123-157.
- Glick, B.R., Li, J., Shah, S., Penrose, D.M. et Moffatt, B.A.** (1999). ACC deaminase is central to the functioning of plant growth promoting rhizobacteria. in : Kanellis, A.K., et al. (Eds.), Biology and Biotechnology of the Plant Hormone Ethylene II. Springer., Dordrecht, pp. 293-298.
- Gonzalez-fernandez, R., Valero-Galvan, J., Gomez-Galvez, F.J. et Jorrin-novo,** (2015). Unraveling the in vitro secretome of the phytopathogen *Botrytis Cinerea* to understand the interaction with its hosts. 6 ,1-7.
- Goudjil, B.M., Ladjel, S., Zighmi, S., Hammoya, F., Bensaci, M.B., Mehani, M. et Bencheikh, S.** (2016). Bioactivity of Laurus Nobilis and Mentha Piperita essential oils on some phytopathogenic fungi (in vitro assay). J. Mater. Environ. Sci. 7 (12), 4525-4533.

- Grobkinsky, D. K., Naseem, M., Abdelmohsen, U. R., Plickert, N., Engelke, T., Griebel, T. et van der Graaff, E.** (2011). Cytokinins mediate resistance against *Pseudomonas syringae* in tobacco through increased antimicrobial phytoalexin synthesis independent of salicylic acid signaling. *Plant Physiol.* 157 (2), 815-830.
- Gupta, A., Gopal, M. et Tilak, K.V.B.** (2000). Mechanism of plant growth promotion by rhizobacteria.
- Gupta, G., Parihar, S.S., Ahirwar, N.K., Snehi, S.K. et Singh, V.** (2015). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. *J. Microbiol. Biochem. Technol.* 7 (2), 96-102.
- Gupta, S. et Rashotte, A.M.** (2012). Down-stream components of cytokinin signaling and the role of cytokinin throughout the plant. *Plant cell reports.* 31 (5), 801-812.
- Gupta, S.S.** (2003). Chemotactic response of plant-growth- promoting bacteria towards roots of vesicular-arbuscular mycorrhizal tomato plants. *FEMS. Microbiol. Ecol.* 45 (3), 219-227.
- Haas, D. et Défago, G.** (2005). Biological control of soil-borne pathogens by *fluorescent pseudomonads*. *Natra. Rev. Microbiol.* 3 (4), 307-319.
- Hanouni, N.** (2012). Evaluation du métabolisme respiratoire et enzymatique des racines de blé dur (*Triticum durum Desf*) issues de plantes infectées par les maladies cryptogamiques et de plantes traitées avec un fongicide (ARTEA EC 330). Thèse doctorat de l'université de Annaba, pp 19.
- Hollomon, D.W.** (2015). Fungicide Resistance: 40 Years on and Still a Major Problem, in: In: Ishii, H. Hollomon, D.W. (Ed.), *Fungicide Resistance in Plant Pthogens*. Springer., Japan, pp. 3-11.
- Illmer, P. et Schinner, F.** (1995). Phosphate solubilizing microorganisms under non-sterile conditions. 46, 197-204.

- Jewell, M.C., Campbell, B.C. et Godwin, I.D.** (2010). Transgenic plants for abiotic stress resistance, in : Kole. C., et al. (Eds.), Transgenic crop plants. Springer., Berlin, pp. 67-132.
- Jofre, E., Lagares, A. et Mori, G.** (2004). Disruption of d'TDP-rhamnose biosynthesis modifies lipopolysaccharide core, exopolysaccharide production, and root colonization in *Azospirillum brasilense*. FEMS. Microbiol. Lett. 231 (2), 267-275.
- Jourdan, E., Ongenara, M. et Thonart, p.** (2008). Caractéristiques moléculaires de l'immunité des plantes induite par les rhizobactéries non pathogènes. Biotechnol. Agron. Soc. Environ.12 (4), 437-449.
- Kang, S.M., Waqas, M., Khan, A.L. et Lee, I.J.** (2014). Plant-growth-promot rhizobacteria potential candidates for giberellins production and corp growth promotion, in : Miransari, M. (Ed.), use of Microbes for the Alleviation of Soil Stress. Sringer., New York, pp. 1, 1-19.
- Kende, H. et Zeevaart, J.** (1997). The five" Classical" plant hormones. The plant cell. 9 (7), 1197
- Kerroum, F.** (2015). Identification et caractérisation du phytophthora infectants agent pathogène du mildiou de la pomme de terre et essai de lutte biologique.Thèse doctorat de l'université d'oran, pp. 7.
- Khan, M.S., Zaidi, A., Wani, P.A. et Oves, M.** (2009). Role of plant growth promoting rhizobacteria in the remediation of metal contaminated soils. Environ. Chem. Lett. 7 (1), 1-19.
- Kim, J. et Rees, D.C.** (1994). Nitrogenase and biological nitrogen fixation. Biochem. 33 (2), 389-397.
- Kim, Y.C., Hur, J.Y. et Park, S.K.** (2019). Biocontrol of *Botrytis cinerea* by chitin-based cultures of *Paenibacillus elgii* HOA73. Eur. J. Plant Pathol. 155 (1), 253-263.
- King, R.W., Moritz, T., Evans, L.T., Martin, J., Andersen, C.H., Blundell, C. et Chandler, P.M.** (2006). Regulation of flowering in the long-day grass *Lolium*

temulentum by gibberellins and the Flowering locus T gene. *Plant Physiol.* 141 (2), 498-507.

- Komárek, M., Č adková, E., Chrastny, V., Bordas, F. et Bollinger, J.** (2010). contaminatin of vineyard soils with fungicides: Areview of environmental and toxicological. aspects. *Environ. Int.* 36, 138-151.
- Kumar, S., Agarwal, M., Dheeman, S., et Maheshwari, D.K.** (2015). Exploitation of phytohormone-producing PGPR in development of multispecies bioinoculant formulation, in : Maheshwari, D.K. (Ed.), *Bacterial Metabolites in Sustainable Agroecosystem*. Springer., Cham, pp. 297-317.
- Labuschagne, N., Pretorius, T., et Idris, A.H.** (2010). Plant growth promoting rhizobacteria as biocontrol agents against soil-Borne plant diseases, in : Maheshwari, D.K. (Ed.), *Plant Growth and Health Promoting Bacteria*. Springer., Berlin, pp. 211-230.
- Laradj, Z.K.** (2017). Isolement et caractérisation des rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes capables de lutter contre le *Fusarium*. Thèse doctorat de l'université de Sidi Bel Abbas, pp. 12.
- Lee, J.P., Lee, S.W., Kim, C.S., Son, J.H., Song, J.H., Lee, K.Y., Kim, H.J., Jung, et Moon, B.J.** (2006). Evaluation of formulations of *Bacillus licheniformis* for the biological control of tomato gray mold caused by *Botrytis cinerea*. *Biol. control.* 37 (3), 329-337.
- Lenin, G. et Jayanthi, M.** (2012). Indole Acetic Acid, Gibberellic Acid and Siderophore Production by PGPR Isolates from Rhizospheric Soils of *Catharanthus roseus*. *Int. J. Pharm Biol. Arch.* 3 (4), 933-938.
- Lepinay, C.** (2013). Etude des interactions plantes-microbes et microbes-microbes, au sein de la rhizosphère, sous un aspect coûts-bénéfices, dans un contexte de variation environnementale. Thèse doctorat de l'université de BOURGOGNE, pp. 18.
- Lepoivre, P.** (2003). *Phytopathologie : Base moléculaire et biologique des pathosystème et fondement des stratégies de lutte*. Les presses agronomiques de Gembloux, 1ere edition., De Boeck, Université Bruxelles.

- Maheshwari, D.K., Dheeman, S. et Agarwal, M.** (2015). Phytohormone-producing PGPR for sustainable agriculture, in : Maheshwari, D. K. (Ed.), Bacterial Metabolites in Sustainable Agroecosystem. Springer., India. pp, 159-182.
- Martin, F. et Lebrun, M.H.** (2009). Champignon pathogènes. Biofutur. 296, pp.1.
- Martínez-Hidalgo, P., García, J.M. et Pozo, M.J.** (2015). Induced systemic resistance against *Botrytis cinerea* by *Micromonospora* strains isolated from root nodules. Front. Microbiol. 6, 922.
- Mezaache-Aichour, S., Haichour, N., Khaled, A. et Zerroug, M.M.** (2015). Recherche extraction et mise en évidence de substances antifongiques chez les souches indigènes de *Pseudomonas* sp. Antagonistes. 5th Conférence Internationale sur les Méthodes Alternatives de Protection des Plantes, 11-13 mars, 2015, Nouveau Siècle, Lille, France. AFPP, pp. 117-121.
- Milet, A.** (2017). Isolement de microorganismes à partir du sol des régions arides et sélection d'isolats à effet antagoniste sur l'agent de l'Alternariose. Thèse doctorat de l'université de Constantine, pp. 35.
- Mok, M.C.** (1994). Cytokinins and plant development. Cytokinins: chemistry, activity and function, pp. 155-166.
- Munees, A. et Mulugeta, K.** (2014). Mechanisms of application of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. J. King Saud. Univ. Sci. 26 (1), 1-20.
- Naika, S., De Jude, J.V.L., De Goffau, M., Hilmi, M. et Van Dam, B.** (2005). Agrodoc 17, La culture de la tomate. Production transformation et commercialisation. Editor : Barbara van Dam, pp. 105
- Ni, L. et Punja, Z.K.** (2019). Management of fungal diseases on cucumber (*Cucumis sativus* L.) and tomato (*Solanum lycopersicum* L.) crops in greenhouses using *Bacillus subtilis*, in: Islam, M. T., et al. (Eds.), Bacilli and Agrobiotechnology: Phytostimulation and Biocontrol, Bacilli in Climate Resilient Agriculture and Bioprospecting. Springer., Canada, pp. 1-28.
- Nicklin, J., Graeme-Cook, K., Paget, T. et Killington, R.** (2000). L'essentiel en microbiologie. Berti. Paris, P. 210-216.

- Nihorimbere, V., Ongena, M., Smargiassi, M. et Thonart, P.** (2011). Beneficial effect of the rhizosphere microbial community for plant growth and health. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 15 (2), 327-337.
- Odoh, C.K.** (2017). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): A Bioprotectant bioinoculant for Sustainable Agrobiolgy. *Int. J. Res. Biol. Sci.* 4 (5), 123-142.
- Ordentlich, A., Elad, Y. et Chet, I.** (1988). The role of chitinase of *Serratia marcescens* in biocontrol of *Sclerotium rolfsii*. *Phytopathol.* 78 (1), 84-88.
- Paoletti, M.G. et Pimentel, D.** (1996). Genetic Engineering in Agriculture and the environment. *Bioscience.* 46 (9), 665-673.
- Patten, C.L. et Glick, B.R.** (1996). Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. *Canadian. J. Microbiol.* 42 (3), 207-220.
- Peng, X.D., Huang, S.L. et Lin, S.H.** (2015). First report of corn kernel brown spot disease caused by *Mucor irregularis* in China. *Plant Dis.* 99 (1), 159-160.
- Prasad, S., Kumar, M. et Varma, A.** (2015). Role of PGPR in soil fertility and plant health. *Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Medicinal Plants.* *Soil Biol.* 42, 247-260.
- Rai, A. et Nabti, E.** (2017). Plant growth-promoting bacteria : importance in vegetable production. In *Microbiol Strategies for vegetable Production.* Springer., Cham. pp, 23-48.
- Rai, A., Cherif, A., Cristina, C.R.U.Z. et Nabti, E.** (2018). Extracts from Marine macroalgae and *Opuntia ficus-indica* cladodes enhance halotolerance and enzymatic potential of diazotrophic rhizobacteria and their impact on wheat germination under salt stress. *Pedosphere.* 28 (2), 241-254.
- Reddy, P.P.** (2015). Impacts on Plant Pathogens, in : Reddy, P.P.(Ed.), *Climate Resilient Agriculture for Ensuring Food Security.* Springer., India, pp. 151-171.
- Reetha, S., Bhuvanewari, G., Thamizhiniyan, P. et Mycin, T. R.** (2014). Isolation of indoleacetic acid (IAA) producing rhizobacteria of *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis* and enhance growth of onion (*Allium cepa* L.). *Int. J. Microbiol. Appl. Sci.* 3 (2), 568-574

- Reinoso, H., Luna, V., Dauría, C., Pharis, R.P. et Bottini, R.** (2002). Dormancy in peach (*Prunus persica*) flower buds. VI. Effects of gibberellins and an acylcyclohexanedione (trinexapac-ethyl) on bud morphogenesis in field experiments with orchard trees and on cuttings. *Canadian. J. Bot.* 80 (6), 664-674.
- Reyes, M.E.Q., Rohrbach, K.G. et Paull, R.E.** (2004). Microbial antagonists control postharvest black rot of pineapple fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 33 (2), 193-203.
- Rojas-Solís, D., Zetter-Salmón, E., Contreras-Pérez, M., del Carmen Rocha-Granados, M., Macías-Rodríguez, L. et Santoyo, G.** (2018). *Pseudomonas stutzeri* E25 and *Stenotrophomonas maltophilia* CR71 endophytes produce antifungal volatile organic compounds and exhibit additive plant growth-promoting effects. *Biocatalys. Agric. biotechnol.* 13, 46-52.
- Romera, F.J., García, M.J., Lucena, C., Martínez-Medina, A., Aparicio, M.A., Ramos, J. et Pérez-Vicente, R.** (2019). Induced systemic resistance (ISR) and Fe deficiency responses in dicot plants. *Front. Plant Sci.* 10, 287.
- Ruzzi, M. et Aroca, R.** (2015). Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants in horticulture. *Sci. Horticulturae.* 196, 124-134.
- Saleem, M., Arshad, M., Hussain, S. et Bhatti, A. S.** (2007). Perspective of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) containing ACC deaminase in stress agriculture. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 34 (10), 635-648.
- Salvatierra-Martinez, R., Arancibia, W., Araya, M., Aguilera, S., Olalde, V., Bravo, J. et Stoll, A.** (2018). Colonization ability as an indicator of enhanced biocontrol capacity—An example using two *Bacillus amyloliquefaciens* strains and *Botrytis cinerea* infection of tomatoes. *J. Phytopathol.* 166 (9), 601-612.
- Sarven, M.S., Hao, Q., Deng, J., Yang, F., Wang, G., Xiao, Y. et Xiao, X.** (2020). Biological Control of Tomato Gray Mold Caused by *Botrytis Cinerea* with the Entomopathogenic Fungus *Metarhizium Anisopliae*. *Pathogen.* 9 (3), 213.

- Saxena, A.K. et Tilak, K.V.B.R.** (1998). Free-living nitrogen fixers: Its role in crop production. *Microbes for Health, Wealth and Sustainable Environment*, Malhotra Pub CoNew Delhi. Edited by Verma AK, pp. 25-64.
- Schaller, G.E. et Kieber, J.J.** (2014). Cytokinins. *The Arabidopsis Book*/American Society of Plant Biologists.
- Sebihi, F.** (2016). Effet PGPR des souches de *Pseudomonas fluorescens* isolées de la rhizosphère du blé cultivé dans la région de Constantine. Thèse doctorat de l'université de Constantine, pp. 8.
- Shaikh, S. et Sayyed, R.Z.** (2015). Role of plant growth-promoting rhizobacteria and their formulation in biocontrol of plant diseases. in : Shaikh,S.S. Sayyed, R.Z.Z. (Ed.). *Plant microbes symbiosis: applied facets*. Springer., India, pp. 337-351.
- Silini, A.** (2013). Effet des molécules osmoprotectrices sur la survie et l'activité de *Azotobacter* et sur la croissance de blé dure en milieu salin. Thèse doctorat de l'université de Sétif, pp. 25.
- Singh, P.K., Kumar, V., Maurya, N., Choudhary, H., Kumar, V. et Gupta, A.K.** (2014). Grassroots Solutions to Overcome Abiotic and Biotic Environmental Stress in Agriculture, in:Singh, S.B., et al. (Eds.), *Translational Research in Environmental and Occupational Stress*. Springer., India, pp. 11-16.
- Sivasakthi, S., Usharani, G. et Saranraj, P.** (2014). Biocontrol potentiality of plant growth promoting bacteria (PGPR) - *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis*. *Afr. J. Agric. Res.* 9 (16), 1265-1277.
- Soanes, D.M., Skinner, W., Keon, J., Hargreaves, J. et Talbot, N.J.** (2002). Genomics of Phytopathogenic Fungi and the Development of Bioinformatic Resources. *MPMI.* 15 (5), 421-427.
- Sokolova, M.G., Akimova, G.P. et Vaishlya , O.B.** (2011). Effect of phytohormone synthesized by rhizosphere bacteria on plants. *Appl. Biochem. Microbiol.* 47 (3),247.
- Somers, E., Vanderleyden, J. et Srinivasan, M.** (2004). Rhizosphere bacterial signalling: a love parade beneath our feet. *Critical. Rev. Microbiol.* 30 (4), 205-240.

- Spaepen, S., Cassán, F. et Vanderleyden, J.** (2014). Physiological and agronomical aspect of phytohormone production by model plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) belonging to the genus *Azospirillum*. *J. Plant Growth Regul.* 33 (2), 440-459
- Taller, B.J. et Wong, T.Y.** (1989). Cytokinins in *Azotobacter vinelandii* culture medium. *Appl. Environ. Microbiol.* 55 (1), 266-267.
- Toral, L., Rodríguez, M., Béjar, V. et Sampedro, I.** (2018). Antifungal activity lipopeptides from *Bacillus* XT1 CECT 8661 against *Botrytis cinerea*. *Front. Microbiol.* 9, 1315
- Toral, L., Rodríguez, M., Béjar, V. et Sampedro, I.** (2020). Crop Protection against *Botrytis cinerea* by Rhizosphere Biological Control Agent *Bacillus velezensis* XT1. *Microbiol.* 8 (7), 992.
- Toundou, O.** (2016). Evaluation des caractéristiques chimiques et agronomiques de cinq composts de déchets et étude de leurs effets sur les propriétés chimiques du sol, la physiologie et le rendement du maïs (*Zea mays* L. Var. Ikenne) et de la tomate (*Lycopersicon esculentum* L. Var. Tropimech) sous deux régimes hydriques au Togo. Thèse doctorat de L'Université de LOME, pp. 20.
- Vessey, J.K.** (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil.* 255 (2), 571-586.
- Viret, O., Bloesch, B., Dubuis, P.H. et Gindro, K.** (2010). Epidémiologie de *Botrytis Cinerea* et stratégies de lutte. *Rev. Viticulture. Arboriculture. Horticulture.* 42 (3), 162-167
- Vivanco, J.M.** (2000). By Plant Growth Regulators. *Plant growth regulators in agriculture and horticulture: Their role and commercial uses.* vol 1.
- Walker, A.S.** (2013). Diversité et adaptation aux fongicides des populations de *Botrytis cinerea*, agent de la pourriture grise. Thèse doctorat de l'université Paris-Sud.
- Wang, H., Shi, Y., Wang, D., Yao, Z., Wang, Y., Liu, J., Zhang, S. et Wang, A.** (2018). A biocontrol strain of *Bacillus subtilis* WXCDD105 used to control

tomato *Botrytis cinerea* and *Cladosporium fulvum* cooke and promote the growth of seedlings. Int. J. Mol. Sci. 19 (5), 1371.

Went, F.W. et Thimann, K.V. (1937). Phytohormones. The Macmillan Company, New York.

Werner, T. et Schmülling, T. (2009). Cytokinin action in plant development. Curr. Plant Biol. 12 (5), 527-538.

whipps, J.M. (2001). Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. J. Experm. Bot. 52, 487-511.

Williamson, B., Tudzynski, B., Tudzynski, P. et vanKan, J.A.L. (2007). *Botrytis cinerea* : the cause of grey mould disease. Mol. Plant Pathol. 8 (5), 561–580.

Yoldas, F., Ceylan, S., Mordogan, N. et Esetlili, B.C. 2011. Effect of organic and inorganic fertilizers on yield and mineral content of onion (*Allium cepa* L.). Afr. J. Biotechnol.10 (55), 11488-11492.

Zahir, I., Babouchi, M., Boulanour, H. et El Louyti, M. (2009). Effet des microorganismes isolés à partir des boitopes Marocains sur les phytopathologies. Rev. Agrobiol. 8 (2), 971-983.

Ziane, H. (2018). Application des champignons mycorhizes à arbuscules dans la culture de tomate industrielle. Thèse de doctorat de l'université Badji Mokhtar-Annaba, pp. 26.

Résumé

Résumé

Les problèmes environnementaux, directement liés au développement de l'industrie chimique et à l'expansion des populations, ont constitué une menace majeure pour l'agriculture et obligé les scientifiques et les agriculteurs à développer des techniques physico-chimiques pour maintenir une production alimentaire suffisante. Cependant, ces techniques sont perturbatrices, exigeantes en main-d'œuvre et relativement coûteuses. Récemment, l'application du PGPR pour la biorestauration des sols et l'amélioration de la croissance et de la santé des plantes a reçu une attention considérable pour ses avantages écologiques rentables. Des bactéries comme celles appartenant aux genres *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Arthrobacter*, *Azotobacter*, etc. ont prouvé leur efficacité en tant qu'agent de lutte biologique, protégeant la tomate contre *Botrytis cinerea*, l'un des ravageurs fongiques les plus virulents au monde. L'importance de ces travaux vient du fait que la tomate est l'un des produits agricoles les plus consommés au monde, mais aussi du fait que les PGPR constituent une meilleure alternative aux produits chimiques nocifs utilisés en agriculture.

Mots-clés : pourriture grise, biocontrol, engrais, rhizosphère, bactérie du sol.

Abstract

Unfortunately, environmental problems, directly linked to the development of chemical industries and populations' expansion, posed a major threat to agriculture and forced scientists and farmers to develop physicochemical techniques to maintain sufficient food production. However, these techniques are disruptive, labor intensive and relatively expensive. Recently, PGPR application for soil bioremediation plant growth/health improvement has received considerable attention for its cost-effective and ecological benefits. Bacteria such as those belonging to the genera *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Arthrobacter*, *Azotobacter*, etc. have been shown to be effective as biological control agents, protecting tomatoes against *Botrytis cinerea*, one of the most virulent fungal pests in the world. The importance of these reports stems from the fact that tomatoes are one of the most consumed agricultural products in the world, but also to the fact that PGPR could constitute better alternatives to the harmful chemicals used in agriculture.

Keywords: gray mold, biocontrol, fertilizer, rhizosphere, soil bacteria.

الملخص

إن التغير المناخي المرتبط أساسا بتطوير الصناعة و التوسع العمراني في العالم، أدى إلى تهديد القطاع الزراعي، مما دفع العلماء والمزارعين إلى تطوير تقنيات فيزيوكيميائية للمحافظة على صحة التربة وتوفير الإنتاج الغذائي الكافي. للأسف، هذه التقنيات تضر بالبيئة كما أنها تحتاج إلى وفرة اليد العاملة و تكلفتها عالية. في الآونة الأخيرة، تلقى استعمال البكتيريا المساعدة على نمو النبات (PGPR) للمعالجة الحيوية للتربة وتحسين نمو و صحة النبات اهتماما كبيرا نظرا لفوائده البيئية وتكلفته المنخفضة. بكتيريا كذلك التي تنتمي إلى *Enterobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter*، الخ التي أثبتت فعاليتها كعامل تحكم بيولوجي لحماية الطماطم ضد *Botrytis cinerea*، واحدة من أخطر الآفات الفطرية في عالم النبات. تكمن أهمية هذه الدراسات في كون الطماطم واحدة من المنتجات الزراعية الأكثر استهلاكاً في العالم، إضافة إلى أن PGPR تعد بديلاً هاماً للمواد الكيميائية الضارة المستخدمة في الزراعة.

الكلمات المفتاحية : العفن الرمادي، المراقبة الحيوية، الأسمدة، الجذور، بكتيريا التربة.