

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Béjaïa

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de microbiologie
Spécialité : Microbiologie appliquée



Réf :

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

**Effet des bacteries du sol sur certains
champignons pathogenes des plantes**

Présenté par :
Boudraa tinhinane & Bouhraoua zina

Soutenu le : 11/09/2022

Devant le jury composé de :

| | | |
|------------------|------------|-----------|
| Mme.SALMI | MCB | Président |
| M NABTI El-hafid | Professeur | Encadreur |
| M. AMIR | MCA | Examineur |

Année Universitaire : 2021 / 2022

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage pour réaliser ce travail.

En préambule à ce mémoire, nous souhaiterions adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à sa élaboration, ainsi qu'à la réussite de cette année universitaire des plus remplies.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes auxquelles nous voudrions témoigner tout notre reconnaissance.

*Notre gratitude va tout d'abord à notre promoteur Monsieur **nabti el-hafid** qui nous a honorés de sa confiance, en nous acceptant d'être ses disciples.*

*Aussi, nous tenons à sincèrement remercier, Monsieur **H**, qui, en tant que Co-promoteur, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de cette étude, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer.*

Pour finir, il nous est plus qu'agréable de réserver l'expression de notre gratitude et nos remerciements les plus particuliers, aux membres de nos familles respectives qui ont su nous encourager et nous soutenir, durant toute cette année et celles d'avant. Puissent-ils être fiers de nous

Enfin, Nous tenons à remercier le président et les membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail

Table de matière

Sommaire

Remerciements

Table de matière

Liste d'abréviation

Liste des tableaux

Liste des figures

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Introduction Générale | 1 |
| I. Chapitre I: La microflore du sol | 3 |
| I.1. Généralités sur les bactéries du Sol..... | 4 |
| I.2. Caractéristiques de la rhizosphère..... | 5 |
| I.3. Les exsudats racinaires..... | 6 |
| I.4. La fertilité biologique du sol..... | 6 |
| I.5. Les rhizobactérie..... | 6 |
| I.6. Microorganismes et rhizosphère..... | 7 |
| I.6.1. Les Bactéries épiphytes (de surface des racines)..... | 7 |
| I.6.2. Bactéries endophytes..... | 8 |
| I.7. Les interactions entre les microorganismes de la rhizosphère..... | 8 |
| I.7.1. Commensalisme..... | 8 |
| I.7.2. Mutualisme..... | 8 |
| I.7.3. Compétition..... | 9 |
| I.7.4. L'hyper-parasitisme..... | 9 |
| I.7.5. Antagonisme..... | 9 |
| I.8. Effets des rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes..... | 9 |
| I.8.1. Effet direct..... | 9 |
| I.8.1.1. La Solubilisation du phosphate..... | 10 |
| I.8.1.2. La production des sidérophores..... | 10 |
| I.8.1.3. La Fixation d'azote..... | 10 |
| I.8.1.4. La Production des phytohormones..... | 11 |
| I.8.1.5. Induction de la résistance systémique..... | 11 |
| I.8.2. Effet indirect..... | 11 |
| I.8.2.1. La compétition..... | 11 |
| I.8.2.2. La production d'antibiotique..... | 12 |
| I.8.2.3. Détoxification du milieu..... | 12 |
| I.9. Diversité taxonomique des PGPR..... | 12 |
| I.9.1. <i>Proteobacteria</i> | 12 |

Sommaire

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| I.9.1.1. <i>Alphaproteobacteria</i> | 12 |
| I.9.1.2. <i>Betaproteobacteria</i> | 13 |
| I.9.1.3. <i>Gammaproteobacteria</i> | 13 |
| I.9.1.3.1. <i>Les Pseudomonas</i> | 13 |
| A. Classification et habitat | 13 |
| B. Le genre <i>Pseudomonas</i> en association avec les plantes..... | 14 |
| C. Historique et outils d'identification | 14 |
| D. Caractéristiques métaboliques..... | 14 |
| E. La classification phénotypique..... | 15 |
| F. La classification phéno-génétique..... | 15 |
| I.9.2. <i>Actinobacteria</i> | 15 |
| I.9.3. <i>Firmicutes</i> | 15 |
| I.9.3.1. <i>Bacillus</i> | 16 |
| A. Caractéristiques métaboliques..... | 16 |
| B. Caractères bactériologiques du genre <i>Bacillus</i> : | 16 |
| C. Caractères physiologiques..... | 17 |
| II. Chapitre II: Les maladies Phytopathogènes | 18 |
| II.1. Généralités sur les champignons phytopathogène | 19 |
| II.1.1. <i>Archimycètes</i> | 19 |
| II.1.2. <i>Phycomycètes</i> | 19 |
| II.1.3. <i>Ascomycètes</i> | 19 |
| II.1.4. <i>Basidiomycètes</i> | 19 |
| II.1.5. <i>Deutéromycètes</i> | 20 |
| II.2. Les principaux genres de champignons telluriques phytopathogène..... | 20 |
| II.2.1. Genre <i>Aspergillus</i> | 20 |
| II.2.1.1. Généralités | 20 |
| II.2.1.2. Potentiel toxigène | 20 |
| II.2.2. Genre <i>Penicillium</i> | 21 |
| II.2.2.1. Généralités | 21 |
| II.2.2.2. Potentiel toxigène | 21 |
| II.2.3. Genre <i>Botrytis</i> | 22 |
| II.2.3.1. Généralité..... | 22 |
| II.2.3.2. Le potentiel toxigène | 22 |
| II.2.4. Le genre <i>Fusarium</i> | 22 |

Sommaire

| | |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| II.2.4.1. Généralités | 22 |
| II.2.4.2. Le potentiel toxigène | 23 |
| II.3. Les maladies fongiques des plantes | 23 |
| II.3.1. Définition des maladies des plantes | 23 |
| II.3.2. Les maladies non parasitaires | 24 |
| II.3.3. Les maladies parasitaires | 25 |
| II.3.4. Les étapes de développement des maladies | 25 |
| II.3.4.1. Le contact..... | 25 |
| II.3.4.2. La pénétration | 25 |
| II.3.4.3. L'infection..... | 25 |
| II.3.4.4. Dissémination | 26 |
| II.3.4.5. Conservation | 26 |
| II.4. Principaux maladies fongiques des plantes..... | 26 |
| II.4.1. Cloque de pêcher..... | 26 |
| II.4.2. Graphisme de l'orme..... | 27 |
| II.4.3. Helminthosporiose | 28 |
| II.4.4. Pourriture grise | 28 |
| II.4.5. Mildiou..... | 29 |
| II.4.6. Moniliose | 29 |
| II.5. Les relations plante- pathogènes | 30 |
| II.5.1. La relation non-hôte..... | 30 |
| II.5.2. La relation hôte | 30 |
| III. Chapitre III: La lutte biologique | 32 |
| III.1. La lutte biologique..... | 33 |
| III.1.1. Définition..... | 33 |
| III.1.2. Historique | 34 |
| III.2. Les organismes utilisés en lutte biologique | 35 |
| III.2.1. Les bactéries et la lutte biologique | 35 |
| III.2.2. Mécanismes d'action des agents de lutte biologique..... | 37 |
| III.2.2.1. Compétition pour l'espace et les nutriments | 37 |
| III.2.2.2. Aminocyclopropane-1-Carboxylate (ACC) désaminase | 38 |
| III.2.2.3. Compétition pour le fer et production de sidérophores | 38 |
| III.2.2.4. Antibiose..... | 39 |
| III.2.2.5. Composés volatiles | 40 |

Sommaire

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| III.2.2.6. Induction des systèmes de résistance de la plante hôte | 40 |
| III.2.2.6.1. Déterminants bactériens de l'ISR | 42 |
| A. Les composants de la surface cellulaire | 42 |
| B. Les sidérophores..... | 42 |
| C. Les antibiotiques | 42 |
| III.2.2.7. Parasitisme..... | 42 |
| III.3. Exemples des bactéries appliquées dans la lutte biologique | 43 |
| III.3.1. Activité de <i>Pseudomonas fluorescens</i> dans la lutte biologique..... | 43 |
| III.3.1.1. Colonisation de la rhizosphère | 43 |
| III.3.1.2. Production de substances inhibitrices de la croissance des pathogènes | 43 |
| A. Les antibiotiques | 44 |
| B. Les sidérophores..... | 44 |
| C. Les enzymes | 44 |
| D. L'acide cyanhydrique..... | 44 |
| III.3.1.3. Mécanismes indirects | 44 |
| III.3.2. Activité des espèces de <i>Bacillus</i> dans la lutte biologique | 45 |
| III.4. Les avantages et les inconvénients de la lutte biologique | 47 |
| III.4.1. Les avantages..... | 47 |
| III.4.2. Les inconvénients | 47 |
| Conclusion Générale | 49 |
| Liste bibliographie..... | 51 |

Liste d'abréviation

Listed'abréviation

AIA : Acide indole-3-acétique.

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations .(Organisation des nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture).

HCN : Hydro cyanidric acid

ISR :Induced Systemic Resistance.

P : Phosphore.

P. : Pseudomonas

PGPR: Plant Promoting Growth Rhizobacteria. (Les rhizobactéries promotrices de la Croissance des plantes).

Liste des tableaux

Liste des tableaux

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1: Agents de biocontrôle utilisés pour la lutte contre les agents phytopathogènes | 36 |
| Tableau 2: Diversité des souches bactériennes identifiées comme inducteurs de la résistance systémique chez les plantes et la diversité des pathosystèmes dans lesquels l'ISR est impliquée..... | 41 |
| Tableau 3: Bactéries du genre <i>Bacillus</i> ayant démontré des effets prometteurs contre diverses maladies des plantes | 46 |

Liste des figures

Liste des figures

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 :Le triangle de la maladie | 24 |
| Figure 2 : Feuille d'arbre atteinte de cloque de pêcher causé par le champignon <i>Taphrina deformans</i> | 27 |
| Figure 3 : Un arbre atteint de la maladie hollandaise de l'orme..... | 27 |
| Figure 4 : Helminthosporiose de l'orge causé par <i>Drechslera teres</i> | 28 |
| Figure 5 : Pourriture grise sur chasselas causée par <i>Botrytis cinerea</i> | 28 |
| Figure 6 : Tomates atteintes de mildiou causé par le champignon <i>Phytophthora infestans</i> | 29 |
| Figure 7 : Un fruit atteint de la moniliose causé par <i>Monilia fructigena</i> | 30 |

Introduction Générale

Introduction Générale

D'après la FAO (1999), les maladies des plantes réduisent la production agricole mondiale, de 12 à 14%. Par ailleurs, 70% des dommages sont d'origine fongique et les pertes économiques sont donc énormes.

La majorité des maladies des plantes sont causées par les champignons telluriques, largement distribuées dans le sol, provoquant les pourritures des cultures et endommagent de nombreuses espèces d'arbres forestiers (Belabid et *al.*, 2004).

Le contrôle des maladies des plantes est devenu une priorité pour les agriculteurs au 21^e siècle. La demande croissante d'une fourniture de provision alimentaire stable et saine par une population humaine en plein progrès nécessite un suivi rigoureux et continu de ces maladies (Emmert et Handelsman, 1999).

L'agriculture est l'une des activités humaines qui contribue le plus à l'augmentation des polluants chimiques par l'utilisation excessive d'engrais et de pesticides chimiques qui causent d'autres dommages environnementaux avec des risques éventuels pour la santé humaine. Le protoxyde d'azote (N₂O) est un exemple chimique produit par l'utilisation excessive d'engrais azotés et est une source majeure de gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique (Pravin et *al.*, 2016).

Les pesticides chimiques utilisés depuis de nombreuses années pour lutter contre les agents pathogènes de plantes sont aujourd'hui l'objet de nombreuses critiques en raison des effets néfastes qu'ils exercent sur l'environnement, les aliments et, au final, sur les consommateurs. Cette prise de conscience et cette volonté politique de réduire les risques liés à aux produits chimiques très élevés et parfois mal utilisés signifient le développement rapide de nouvelle façon de protéger les plantes, le respect de l'environnement étant plus que jamais d'actualité ainsi « L'âge d'or » des pesticides chimiques semble révolu, et le développement de méthodes de lutte alternatives, comme la lutte biologique à l'aide de microorganismes, fait l'objet d'une attention croissante (Jonathan, 2013).

La solution plausible consiste en l'utilisation des microorganismes du sol (bactéries, champignons) qui augmentent la capacité d'absorption des nutriments. Les bactéries connues sous le nom de rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPRs) sont les plus prometteuses en ce sens.

Introduction Générale

Les rhizobactéries peuvent être utilisées pour améliorer la santé des plantes et favoriser leur croissance, sans contaminer l'environnement, (Pravin et *al.*, 2016) par une variété de mécanismes qui impliquent la solubilisation des nutriments minéraux. La stimulation de la croissance des racines et l'élimination des maladies racinaires. Depuis les premières études sur les PGPRs dans les années 1950, plusieurs centaines de souches candidates de PGPR ont été criblées et évaluées *in vitro* et *in vivo* à travers le monde. Aujourd'hui, les PGPRs sont utilisés dans les pays développés et les inoculants sont utilisés sur des millions d'hectares de terres de différentes cultures (Martínez et *al.*, 2010).

L'organisme vivant utilisé dans le but de limiter la pullulation et/ou la nocivité des divers ennemis de l'agriculture. On peut donc attribuer à l'agent de lutte biologique le terme «auxiliaire» de l'Homme (Jourdheuil et *al.*, 2016).

C'est dans cet objet qu'on essayé de contribuer par une synthèse bibliographique portant sur l'étude des phytopathogènes et la lutte biologique.

Le travail est scindé en trois chapitres dont chacun traite une partie une thématique relié à la problématique posée.

Chapitre I

La microflore du sol

I.1. Généralités sur les bactéries du Sol

Le sol est considéré comme l'un des environnements les plus complexes de la biosphère et un réservoir majeur de la diversité microbienne. Le sol est à l'interface entre la lithosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère (Alexander, 1977).

Dans les sols, il existe une diversité d'espèces de bactéries extrêmement fortes de l'ordre de 1 million d'espèces par gramme du sol. Elles peuvent être classées de plusieurs manières : sur la base de leurs caractéristiques (morphologie, métabolisme, sources nutritives...)

Elles réalisent un très grand nombre de fonctions vitales comme la minéralisation des matières organiques, le cycle de l'azote, la disponibilité du phosphore ou encore la dégradation de molécules phytosanitaires. Par ailleurs, elles peuvent être impliquées dans la régulation de la croissance racinaire (Verginie et *al.*, 2018).

Les microorganismes telluriques jouent un rôle essentiel dans la fertilité du sol. Ce sont, en particulier, les seuls décomposeurs ultimes de la matière organique ainsi que des acteurs nécessaires dans le recyclage des nutriments au sein des grands cycles biologiques (carbone, azote, phosphore et soufre). A ce titre, les microorganismes constituent le « moteur terrestre » catalysant tous les processus biogéochimiques connus. Les fonctions utiles des microorganismes du sol dans la rhizosphère sont les suivantes :

- Décomposition des résidus de plantes ; d'animaux ; de microorganismes et de déchets organiques à travers la dégradation de sources carbonées et la synthèse d'humus (matière organique stable liée) ; la minéralisation et l'immobilisation de l'azote, du soufre et du phosphore ; puis l'amélioration de la structure du sol (stabilité des agrégats).
- Nutrition à travers l'augmentation de la disponibilité de nutriments pour la plante (P, Mn, Fe, Zn, Cu).
- Fixation biologique d'azote par les bactéries libres ou associées aux plantes non légumineuses et les bactéries symbiotiques fixatrices d'azote.
- Amélioration de la croissance des plantes (effet sur la germination, le développement floral, la biomasse racinaire et aérienne) à travers la production d'hormones de croissance pour les plantes et la protection des plantes contre des pathogènes et autres organismes nuisibles.

- Amélioration de la santé des plantes, par le biais de la lutte biologique, contre les nématodes, les insectes et les mauvaises herbes.
- Epuration des sols et de l'eau par la biodégradation des pesticides et des contaminants exogènes notamment les hydrocarbures et les métaux.
- Epuration de l'air par la réduction de la production du gaz à effet de serre (CO₂, N₂O, CH₄).
- Structuration du sol par la production de substances adhésives et l'agrégation de particules par des champignons filamenteux.
- Régulation des populations microbiennes par prédation des bactéries par les protozoaires, l'antibiose et la compétition/commensalisme.
- Adaptation de plantes à des environnements hostiles par la sélection des plantes résistantes/tolérantes au stress hydrique et l'amélioration de la croissance des plantes en milieu contaminé (phyto-stabilisation/ phyto-remédiation).
- Conservation et enrichissement des réservoirs de biodiversité avec des organismes d'intérêt biotechnologique (enzymes en agroalimentaire et agroindustriel) et pharmaceutique (antibiotiques, anticancéreux). (Adjanohoun *al.*, 2017).

I.2. Caractéristiques de la rhizosphère

La rhizosphère correspond au volume du sol qui entoure les racines. C'est là où se déroulent les principales interactions entre la plante et les microorganismes telluriques, d'une part, et des interactions entre les microorganismes eux-mêmes, d'autre part. La distance à laquelle la racine d'une plante affecte les activités microbiennes varie considérablement selon le type du sol, de l'espèce végétale et des activités microbiennes considérées. La racine de la plante modifie très largement certaines caractéristiques du sol: pH, potentiel hydrique, potentiel d'oxydoréduction et apportent de nombreux éléments *via* les exsudats racinaires (Alabouvette *et al.*, 2018).

IL existe trois composantes distinctes connues dans la rhizosphère :

- a) **La rhizosphère** : c'est la zone du sol influencée par les racines grâce à la libération de substrats affectant l'activité microbiennes ;
- b) **Le rhizoplan** : il s'agit de la surface racinaire y compris les particules du sol adhérant fortement.

c) **La racine elle-même (endo-rhizosphère)** : est une partie du système racinaire, parce que certains microorganismes endophytes sont capables de coloniser les tissus racinaires internes (Bowen et Rovira, 1991).

I.3. Les exsudats racinaires

Les exsudats représentent la partie la plus importante des substances sécrétées par les racines surtout dans la région apicale. Ce sont généralement des petites molécules composées de sucres, d'acides aminés, de facteurs de croissance, de vitamines, d'enzymes et d'acides organiques. Ils représentent également une source de nutriments pour la microflore de la rhizosphère (Soufiane, 1998).

Ils sont les rhizo-dépôts les plus rapidement assimilés par les microorganismes de la rhizosphère grâce à leur nature simple (Guihard, 2010).

I.4. La fertilité biologique du sol

Avant d'aborder plus spécifiquement le rôle des microorganismes favorisant la croissance et/ou le développement des plantes, il convient de tenter de définir ce qu'est la fertilité biologique des sols.

La fertilité biologique est une aptitude des sols à apporter les éléments essentiels à la croissance des végétaux par l'action des organismes vivants (animaux, insectes, champignons, parasites) ayant des interrelations complexes et qui se nourrissent de débris végétaux ou animaux. L'ensemble de ces organismes contribue à la dégradation de la matière organique qui entraîne la libération des éléments nutritifs nécessaires à la plante (Alabouvette et Cordier, 2018).

I.5. Les rhizobactérie

Le terme rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) a été initialement utilisé pour décrire uniquement le groupe microbien impliqué dans la lutte (Kloepper et *al.*, 1980). Ce terme a ensuite été élargi pour englober toutes les bactéries bénéfiques associées aux plantes.

Les PGPRs (plant growth promoting rhizobacteria : bactéries promotrices de la croissance des plantes) forment un groupe hétérogène de bactéries qui peuvent être trouvées dans la rhizosphère, à la surface des racines et en association avec les racines. Ces

germes ont la capacité d'améliorer, directement ou indirectement, la qualité de vie de la plante (Bent et *al.*, 2001).

Les rhizobactéries peuvent avoir un effet positif, négatif ou neutre sur la croissance des végétaux. Les rhizobactéries regroupent différents groupes bactériennes : les plus réponsus : *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azotobacter* et *Enterobacter*... (Beauchamp, 1993).

I.6. Microorganismes et rhizosphère

La rhizosphère est riche en microorganismes, surtout en bactéries et champignons microscopiques, qui se nourrissent de cellules et de substances sécrétées par la plante dans un processus appelé rhizodéposition. Elle comprend une grande quantité de protéines, sucre et autres sécrétions racinaires. De nombreuses interactions sont observées entre plantes, bactéries et virus du sol (Hinsinger et *al.*, 1996)

En plus de ces classifications fonctionnelles, les microorganismes de la rhizosphère peuvent aussi être regroupés selon les compartiments de la plante qu'ils occupent, dans telle classification on distingue:

- (I) Les bactéries vivant dans le sol à côté des racines (rhizosphère), utilisant des métabolites libérés par les racines comme sources de carbone et d'azote pour leur croissance.
- (II) Les bactéries colonisant le rhizoplan (surface radiculaire).
- (III) Les bactéries qui résident dans les tissus des racinaires dans l'espace entre les cellules corticales (endophytes).
- (IV) La bactérie vivant à l'intérieur des cellules dans les structures profondes spécialisées « les nodules » comme les bactéries fixatrices d'azote (Gray and Smith, 2005).

I.6.1. Les Bactéries épiphytes (de surface des racines)

Les bactéries épiphytes sont des bactéries qui sont capables de vivre et de multiplier sur les surfaces des différentes parties de la plante (racines et feuilles) (Leben, 1965 ; Hirano et Upper, 1991)

Les bactéries épiphytes peuvent être éliminées des feuilles par lavage (Leben, 1965) ou tuées par radiation aux UV ou par une désinfection chimique de la surface des racines (Henis et Basan, 1986).

I.6.2. Bactéries endophytes

Les bactéries endophytes ont été définies comme des microorganismes qui pourraient vivre à l'intérieur des organes végétaux désinfectés (Hardoim et *al.*, 2008). Et qui peuvent être isolées à partir de la surface des tissus végétaux stérilisés et ne causent pas de mal visiblement aux plantes hôtes (Hallmann et *al.*, 1997). Les bactéries endophytes peuvent être classées comme «obligatoires» ou «facultatives». Les bactéries endophytes obligatoires sont strictement dépendantes de la plante hôte pour leur croissance et leur développement. Leur transmission à d'autres plantes se produit à la verticale ou par des vecteurs (Baldani et *al.*, 1997).

I.7. Les interactions entre les microorganismes de la rhizosphère

La rhizosphère, c'est une région très riche en matière organique où la population microbienne est multiple et variées. Il faut signaler que les interactions entre les microorganismes sont nombreuses et fortes, elles sont catalysées par les exsudats racinaires (Curl et Truelove, 1986). L'interaction est la suivante :

I.7.1. Commensalisme

La plupart des cas de commensalisme concerne l'utilisation d'un produit secondaire du métabolisme d'une autre espèce. Au cours de cette relation, un organisme tire profit de la présence d'un autre sans que ce dernier ne soit affecté par la présence du premier. Exemple : *Saccharomyces cerevisiae* élabore la riboflavine nécessaire à la croissance de *Lactobacillus casei*.

D'autres cas de commensalisme existent au niveau de la rhizosphère notamment les changements dans les conditions environnementales (humidité, pH, CO₂, O₂, le potentiel osmotique, etc.) par un micro-organisme rendant ainsi un climat favorable pour le développement d'un autre. Aussi, certains organismes dégradent ou neutralisent des substances toxiques favorisant ainsi la croissance des autres (Curl et Truelove, 1986).

I.7.2. Mutualisme

Au cours de cette interaction, deux microorganismes sont capables de vivre indépendamment l'un de l'autre mais peuvent tirer un profit mutuel d'un éventuel voisinage (Curl et Truelove, 1986). Nous citons comme exemple celui de *Proteus vulgaris*

qui a besoin de biotine, mais qui synthétise l'acide nicotinique requis par *Bacillus polymyxa* qui le transforme en biotine (Dommergues et Mangenot, 1970).

I.7.3. Compétition

La compétition entre deux ou plusieurs microorganismes concerne soit les éléments nutritifs, l'espace où les autres facteurs environnementaux qui deviennent limitatifs pour la croissance. Toutefois, l'effet sélectif des exsudats racinaires sur la microflore serait le résultat de la compétition qui oppose des souches à croissance lente et des souches à croissance rapide, ces dernières sont particulièrement favorisées dans la rhizosphère. La fréquence élevée du *Fusarium* dans la rhizosphère serait due au pouvoir compétitif de ce champignon (Dommergues et Mangenot, 1970).

I.7.4. L'hyper-parasitisme

L'hyperparasitisme est l'attaque directe d'un micro-organisme par un autre dans un but nutritionnel (Gagné, 1984). La rhizosphère qui héberge une large variété de populations microbiennes constitue un milieu favorable pour l'apparition du parasitisme. On peut mentionner deux catégories du parasitisme : le parasitisme chez les champignons (mycoparasitisme) où un champignon est parasité par un autre, et le parasitisme chez les bactéries qui est le plus répandu dans le sol.

On citera deux exemples de ce mode de parasitisme :

Bdellovibrio ayant été découvert accidentellement à Berlin. C'est un genre de bactéries de petites tailles qui traversent la paroi d'autres bactéries en s'introduisant dans leur cytoplasme et s'y multiplient aux dépens de leur hôte (Curl et Truelove, 1986). Les bactériophages (virus) dont l'incidence sur les populations bactériennes du sol est beaucoup moins connue.

I.7.5. Antagonisme

En écologie, le terme d'antagonisme désigne une inhibition ou une action défavorable d'un organisme vis-à-vis d'un autre à l'intérieur d'une population microbienne mixte (Curl et Truelove, 1986). L'antagonisme se manifeste généralement soit par une compétition, un hyper-parasitisme, une production de sidérophores ou par une antibiose.

I.8. Effets des rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes

I.8.1. Effet direct

Certaines PGPRs stimulent la croissance des plantes en absence des pathogènes, cette effets directs regroupent les accroissements de la masse aérienne et racinaire, les élongations racinaires, et la croissance accélérées des plantules. Cette stimulation s'explique généralement par le meilleur apport et l'assimilation des éléments nutritifs par la plante. La production de phytohormones et le développement de résistance induite chez les plantes (Beauchamp, 1993).

I.8.1.1. La Solubilisation du phosphate

Le phosphore est un élément indispensable pour la plante (Ezawa et *al.*, 2002). Malgré que la quantité du phosphore dans le sol est élevée mais la majeure partie est insoluble pour être assimilée par la plantes. Le phosphore est présent soit sous forme inorganique tel que l'apatite, soit sous forme organique, notamment le phosphate inositol (phytate du sol), les phospho-monoesters et les phospho-triesters (Khan et *al.*, 2007).

Ces bactéries rhizosphériques ont la capacité de solubiliser le phosphate (Vessey, 2003) et le transforment en phosphate organique par l'action des phosphatases ou en phosphate inorganique par la libération d'acide organique (Klepper et *al.*, 1989).

Elles mettent en jeu des molécules de faible poids moléculaires tels que l'acide citrique, l'acide gluconique ou l'acide oxalique (Glick, 2012).

Les genres de *Bacillus*, *Enterobacter*, *Erwinia* et *Pseudomonas* sont les plus performantes dans la solubilisation du phosphore (Subbaro, 1988 ; Kucey et *al.*, 1989).

I.8.1.2. La production des sidérophores

Le fer (Fe) fait partie des oligoéléments essentiels pour la croissance des végétaux. Il est présent de manière abondante dans les sols sous sa forme ferrique (Fe^{3+}). Or, à l'instar du P, cette forme est peu soluble et difficile à acquérir par les plantes (Morrissey et Guerinot, 2010). Son absorption nécessite alors un transporteur. Certaines bactéries sont capables de libérer des sidérophores, des molécules de faible poids moléculaire ayant une forte affinité pour le fer (Neilands, 1995). Ces sidérophores peuvent former des complexes sidérophore- Fe^{3+} pour extraire, chélater et transporter le fer à proximité des racines. Ce complexe est reconnu au niveau racinaire par des récepteurs protéiques spécifiques où il peut être absorbé. Les plantes produisent elles-mêmes des phyto-sidérophores (Morrissey et Guerinot, 2010).

I.8.1.3. La Fixation d'azote

L'azote se trouve sous forme gazeuse (N_2) dans l'atmosphère et les plantes ne peuvent pas de l'utiliser directement, il faut donc d'abord le transformer en ammoniac grâce à l'action de la nitrogénase par des bactéries dites diazotrophes.

Les associations entre *Azospirillum*-céréales et *Bacillus*-céréales et la symbiose de *Rhizobium*-légumineuses ont assuré une meilleure nutrition azotée (Beauchamp, 1993).

I.8.1.4. La Production des phytohormones

L'un des mécanismes les plus importants pour améliorer la croissance des plantes est la production de phytohormones par les PGPRs. Ce sont des petites molécules de signal produites en très faible concentration, elles agissent comme des messagers chimiques influençant les processus biochimiques, physiologiques et morphologiques dans les plantes. Il existe cinq principaux groupes d'hormones : les auxines, les gibbérellines, l'éthylène, les cytokinines et l'acide abscissique. L'acide indole-3-acétique (AIA) est le plus important du groupe des auxines, il joue un rôle très important dans l'élongation des racines et dans la prolifération des poils absorbants (Martinez et al., 2010).

I.8.1.5. Induction de la résistance systémique

Certaines PGPRs utilisent un phénomène appelé ISR (Induced Systemic Resistance) ou résistance systémique induite pour stimuler le système immunitaire des plantes et leur permettre une résistance contre certains virus, champignons et même les bactéries pathogènes (Benmati, 2014).

L'ISR permet de détecter les agents pathogènes et entraîne des réponses qui les arrêtent ou ralentissent (Jones et Dangl, 2006).

I.8.2. Effet indirect

Certaines PGPRs produisent des effets bénéfiques sur la croissance des plants en présence d'un pathogène ou d'une rhizobacétérie. Ces modes d'action indirects sont généralement attribués à la compétition, la production d'antibiotiques et la détoxification du milieu (Beauchamp, 1993).

I.8.2.1. La compétition

Aux alentours des racines, les microorganismes sont en concurrence pour l'accès aux éléments nutritifs tels que le carbone et le fer, et donc pour l'espace. Les sidérophores libérés par les PGPR permettent de piéger le Fe dans des complexes que les agents

pathogènes du sol ne sont pas capables d'utiliser. Il semble également que les sidérophores produits par les PGPRs ont une affinité plus élevée pour le Fe que les chélateurs libérés par les autres organismes, ce qui leur confère un avantage compétitif (Glick, 2012 ; Kloepper et al. 1980). Il est bien connu que les Sidérophores bactériens sont des captures externes du fer et dont leur efficacité est supérieure à celle des pathogènes. Ainsi ces derniers sont mal alimentés et ont de grande difficulté à se multiplier, ce qui se traduit par la diminution des nuisances causées à la plante hôte (Kirdi, 2011).

I.8.2.2. La production d'antibiotique

C'est un caractère de performance pour la promotion indirecte de la croissance végétale, il consiste à empêcher les agents phytopathogènes d'origine tellurique (Maurhofer et al., 1992). Les antibiotiques sécrétés par les PGPRs jouent un rôle crucial dans l'inactivation des facteurs de germination du pathogène ou la dégradation de leurs facteurs de pathogénicité comme les toxines (Benmati, 2014).

I.8.2.3. Détoxification du milieu

Les phytotoxines sont produites par des microorganismes saprophytes et parasites du sol et inhibent à des faibles concentrations la croissance et le développement des plantes. Dans le sol, ces toxines s'accumulent en quantité plus appréciable lors de monoculture. Certaines souches du genre *Pseudomonas* éliminent ces phytotoxines (Beauchamp, 1993).

I.9. Diversité taxonomique des PGPR

Au cours de ces dernières années, le nombre de PGPRs identifiés a augmenté d'une façon significative. Ces microorganismes cultivables, présentant une diversité de genres et d'espèces, appartiennent majoritairement aux quatre groupes suivants: Proteobacteries, Firmicutes, Actinobacteries et Bacteroidetes (Hugenholtz, 2002).

I.9.1. Proteobacteria

I.9.1.1. Alphaproteobacteria

Les PGPRs appartenant à cette classe sont du genre *Rhizobium*, d'abord classés par leur capacité à fixer l'azote et à noduler les plantes. Ces souches peuvent se comporter comme PGPR quand elles colonisent les racines des plantes non légumineuses. En plus du genre *Rhizobium*, on trouve les nouveaux genres : *Bradyrhizobium*, *Sinorhizobium* et *Mesorhizobium* et le genre *Gluconacetobacter* (Sawada et al., 2003). de la famille des

Acetobacteraceae composée de bactéries endophytes obligatoires colonisant donc les racines, la tige et les feuilles de la canne à sucre.(Tejera et al., 2003).

De plus, le genre *Azospirillum* décrit dans la famille *Rhodospirillaceae* contient des espèces promotrices de la croissance des plantes. Les souches appartenant à ce genre se trouvent sous forme libre dans le sol ou associées aux racines, tiges, feuilles et graines principalement des céréales et des graminées fourragères (Baldani et al., 2005) .

I.9.1.2. Betaproteobacteria

Dans la famille *Burkholderiaceae*, le genre *Burkholderia* forme un groupe monophylétique qui contient diverses espèces ayant des propriétés physiologiques et écologiques variées, elles sont isolées à partir des sols et des plantes. Quelques souches ont la capacité de fixer de façon symbiotique l'azote. *Ralstonia* est un genre également appartenant à la famille des *Burkholderiaceae*. Il est très similaire avec le genre *Burkholderia* (Moulin et al., 2001).

I.9.1.3. Gammaproteobacteria

Dans la famille des *Pseudomonadaceae*, le genre *Azotobacter* est composé de bactéries qui favorisent la croissance des plantes principalement à cause de sa capacité de fixer l'azote et ne pas noduler les plantes (Sturz et Christie, 2003). De plus, *Pseudomonas* est le genre le plus abondant dans la rhizosphère parmi les bactéries à Gram négatif du sol.

Par contre, les genres inclus dans la famille des *Enterobacteriaceae* ayant les traits PGP sont *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Klebsiella*, *Kluyvera*, *Pantoea* et *Serratia* (Garrity, 2005).

I.9.1.3.1. Les Pseudomonas

A. Classification et habitat

Le genre *Pseudomonas* a été découvert en 1894 par Migula, il appartient au phylum des *Proteobacteria*, classe des *Gammaproteobacteria*, famille des *Pseudomonaceae*, ordre des *Pseudomonales* (Moore et al., 2006). Ce sont des bacilles à Gram négatif de diamètre 0.5 à 1 µm sur 1.5 à 5 µm de longueur, mobiles et non sporulés (Bell-Pekins et Lynch, 2002). Ce sont des bactéries ubiquistes formant un large groupe abondant et colonisant les sols, et souvent pathogènes des animaux et des végétaux. Elles possèdent plusieurs caractéristiques

qui les rendent particulièrement intéressantes pour une utilisation comme agents de lutte biologique.

Ainsi leur capacité à coloniser les racines et à y maintenir une forte densité de population est remarquables (Hass et Keel, 2003). Leur taux de croissance plus élevé que la plupart des autres bactéries de la rhizosphère et leur capacité à métaboliser efficacement plusieurs composés des exsudats. Ces bactéries sont facilement isolées et cultivées au laboratoire et sont facilement génétiquement manipulables (Fenton et *al.*, 1992; Chin-A-Woeng et *al.*, 2001)

B. Le genre *Pseudomonas* en association avec les plantes

Elles incluent des souches pathogènes et des souches bénéfiques. Ces bactéries ont une capacité élevée à coloniser la rhizosphère ainsi que les racines des plantes et sont capables de former des associations intimes avec leurs hôtes. Les exsudats racinaires, et en particulier les sucres et les acides aminés, attirent les bactéries par chimiotactisme à la surface des racines.

Ils stimulent notamment la mobilité flagellée des bactéries, ce qui permet à ces dernières de coloniser la rhizosphère (De Weert et *al.*, 2002).

C. Historique et outils d'identification

Les études sur la nutrition bactérienne de Stanier et *al.* (1966) ont montré que l'utilisation de différents composés par *Pseudomonas* comme seule source de carbone et d'énergie fournit essentiellement les conditions nécessaires à la caractérisation phénotypique du genre. Les groupes d'espèces diffèrent considérablement dans leur exigence nutritionnelle. Les groupes d'espèces varient largement dans leur exigence nutritionnelle.

La classification du genre *Pseudomonas* est attribuée pour des bâtonnets droits, strictement aérobies, de couleur crème, Gram-négatif et souvent mobiles par un ou plusieurs flagelles polaires (Sneath et *al.*, 1981).

D. Caractéristiques métaboliques

Le genre *Pseudomonas* est caractérisé par un métabolisme oxydatif et non fermentatif, utilise l'oxygène comme accepteur final d'électrons, alors que d'autres souches utilisent la dénitrification (les nitrates comme accepteurs d'électrons). *Pseudomonas sp* sont chimio-organotrophes facultatifs et peuvent aussi utiliser l' H_2 comme

source d'énergie et n'ont pas besoin de facteurs de croissance pour ce multiplier (Stanier et *al.*, 1966).

E. La classification phénotypique

Ces bactéries ont été caractérisées, regroupées ou identifiées sur la base de caractères phénotypiques : morphologie, pigmentation, réaction vis-à-vis de certains colorants, formation de spores, production d'acide par la dégradation de sucres ou caractérisation demeurent encore la base des systèmes d'identification et de classification des résistance à certains inhibiteurs (Bossis et *al.*, 2000). Des méthodes ont attribué une clé dichotomique pour l'identification des *Pseudomonas fluorescents* en se basant sur des caractères phénotypiques telles que la fluorescence, l'oxydase, la capacité de réduire la gélatine. Cette clé dichotomique permet de discriminer entre les deux principaux groupes de ces *Pseudomonas* à savoir *P. fluorescens* et *P. putida*.

F. La classification phéno-génétique

En analysant les séquences du gène codant pour l'ARNr 16s de 128 espèces de *Pseudomonas*, (Peix et *al.*, 2009) ont conclu que 57 seulement appartenaient aux groupe des *Pseudomonas sensu stricto* ; la comparaison de 1073 nucléotides les a subdivisées en 7 classes

- Le groupe des *P. syringae*.
- Le groupe des *P. putida*.
- Le groupe des *P. chlororaphis*.
- Le groupe des *P. stutzeri*.
- Le groupe des *P. fluorescens*.
- Le groupe des *P. aeruginosa*.
- Le groupe des *P. pertucinogena*.

I.9.2. Actinobacteria

Le genre *Frankia* est un fixateur symbiotique d'azote. Ces bactéries sont associées à des plantes actinorhiziennes pionnier de la colonisation des sols pauvres ou perturbés. D'autres *Actinobactéries* sont également des promoteurs de croissance des plantes mais ne participent pas à la symbiose. Ils appartiennent aux genres *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Curtobacterium* et *Streptomyces*.

I.9.3. Firmicutes

Parmi les bactéries telluriques à Gram positif, le genre *Bacillus* est le type le plus commun et les plus prédominants, ils représentent 95% de la flore isolée.

I.9.3.1. *Bacillus*

Bacillus forme un genre de bactéries à Gram positif, appartenant à la famille des *Bacillacées* (*Bacillaceae*), l'ordre des *bacillales* (*Bacillales*), la classe des bacilles (*Bacilli*). Ces Bactéries sont capables de produire des endospores leur permettant de résister à des conditions environnementales telles que la température, les radiations, les désinfectants et la dessiccation... (Benmati, 2014). Les cellules bactériennes de ce genre ont une taille large, allant de 0.5 à 2.5 µm x 1.2 à 10 µm. Ce genre est généralement présent dans le sol et les plantes où elles interviennent potentiellement dans le cycle de carbone et de l'azote (Koneman, 2001).

A. Caractéristiques métaboliques

Les bactéries du genre *Bacillus* peuvent dégrader la plupart de la matière organique animale ou végétale (cellulose, amidon, protéines, hydrocarbures...) par la production d'enzymes extracellulaires (Chirif, 2014). Ces bactéries sont des aérobies ou aéro-anaérobies facultatives, et tirent leur énergie par respiration ou fermentation. *Bacillus* est hétérotrophe, saprophyte et ubiquitaire, il existe des espèces thermophiles, acidophiles, psychrophiles, alcalinophiles (Bounoua, 2008).

B. Caractères bactériologiques du genre *Bacillus* :

Le genre *Bacillus* représente un groupe hétérogène de bactéries en forme de bâtonnets droit ou légèrement incurvés, à Gram positif avec des extrémités arrondies, à l'exception des membres du *Bacillus cereus* qui possède des extrémités carrées, d'une longueur de 0.9 à 10.0 µm. Ces bactéries sont immobiles ou mobiles par des flagelles péritriches (De Vos et al., 2009). Ces bactéries se présentent sous forme : isolée, en paires ou en chainettes. Elles ont une catalase positive, capables de croître sur des milieux ordinaires comme la gélose nutritive. La morphologie de leurs colonies est très variable. La composition du milieu de culture et les conditions d'incubations influent sur cette morphologie. Mais, malgré cette diversité, les colonies du genre *Bacillus* ne sont pas difficiles à identifier (De Vos et al., 2009).

Les espèces de *Bacillus* possèdent une diversité physiologique importante leur permet de survivre dans des habitats extrêmes, elles peuvent être thermophiles, acidophiles, alcalophiles, halotolérants ou halophiles (Awais et al., 2007). Elles sont

chimio-organotrophes ou chimio-lithotrophes, certaines espèces sont prototrophes et d'autres auxotrophes et exigent des facteurs de croissance (De Vos et al., 2009).

C. Caractères physiologiques

Les caractères physiologiques des *Bacillus* sont impressionnants. Il peut dégrader la plupart de la matière organique animale ou végétale (cellulose, amidon, protéines, hydrocarbures...) par la production d'enzymes extracellulaires. Ce genre est connu pour sa production élevée et variée d'antibiotiques peptidiques, de molécules peptidiques de signal. *Bacillus* est également hétérotrophe, nitrifiant, dénitrifiant, fixateur d'azote, précepteur du fer, oxyde le sélénium, oxydant et réduit le manganèse. A cause de cette variabilité physiologique, les connaissances sur l'écologie du *Bacillus* sont très insignifiantes (Holt et al., 1994).

Traditionnellement, les espèces du genre *Bacillus* sont réparties en trois groupes selon la morphologie de la spore et du sporange :

- **Le groupe I :** constitué des bacilles à Gram positif, présentant une spore centrale ou terminale, sphérique ou ovoïde, ne déformant pas la cellule. Ce groupe est subdivisé en 2 sous-groupes :
 - **Le sous-groupe IA :** composé par des bacilles d'un diamètre supérieur à 1 µm et contenant des inclusions de poly-bêta-hydroxybutyrate (*Bacillus anthracis*, *Bacillus cereus*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus mycoides*, *Bacillus pseudomycoides*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus weihenstephanensis*).
 - **Le sous-groupe IB :** rassemblant des bacilles d'un diamètre inférieur à 1 µm et dépourvus d'inclusions de poly-bêta-hydroxybutyrate (*Bacillus coagulans*, *Bacillus firmus*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus pumilus*...).
- **Le groupe II :** formé d'espèces à Gram variable, présentant une spore ovoïde, centrale ou terminale, déformante (*Bacillus circulans*, *Bacillus stearothermophilus*...).

Le groupe III : caractérisé par des bacilles à Gram variable et présentant une spore sphérique, déformante, terminale ou sub-terminale (*Bacillus fusiformis*, *Bacillus globisporus*, *Bacillus insolitus*, *Bacillus sphériques*...)

Chapitre II
Les maladies
Phytopathogènes

II.1. Généralités sur les champignons phytopathogène

Les champignons sont définis comme des Eucaryotes, desporogones, et non chlorophylliens, se reproduisent par division sexuée ou asexuée. Le mot « champignon » comprend principalement : les levures, les champignons filamenteux (communément appelés moisissures) et les champignons supérieurs (champignons comestibles) (Sylvain, 1996).

Les champignons filamenteux sont des organismes pluricellulaires dont les organes végétatifs forment un thalle composé de filaments microscopiques, souvent ramifiés, appelés hyphes ; l'ensemble de ces hyphes forme le mycélium. Les hyphes sont entourés d'une paroi protectrice, permettant les échanges avec le milieu extérieur. Elle est en général formée de chitine associée à d'autres constituants (chitosanes, glucanes, protéines) (Champion, 1997).

Les grands groupes de champignons sont au nombre de cinq (Corbaz, 1990).

II.1.1. *Archimycètes*

Ils sont très primitifs, liés à la présence d'eau, parce que les zoospores flagellées ne se trouvent que dans la terre (Corbaz, 1990).

II.1.2. *Phycomycètes*

Les phycomycètes ou siphomycètes sont des champignons primitifs sous forme de thalle aluminé, à cellules germinales flagellaires, aquatiques. Certains moisissures sont des champignons saprophytes ; ils attaquent les aliments, le linge, le cuir (Doucet, 2008).

II.1.3. *Ascomycètes*

Ils ont un mycélium cloisonné ; des spores sexuées se forment dans un sac, l'asque, au centre d'un vaisseau noir appelé périthèce ou apothécie, selon la forme. Les spores de reproduction asexuée se produisent à la surface ou dans divers vaisseaux appelés conidies ou acervuli (Corbaz, 1990).

II.1.4. *Basidiomycètes*

Leur mycélium est également cloisonné. Les spores sexuées ou basidiospores sont formées aux extrémités des basides, similaires des asques. Les basides ne sont pas internées dans des réceptacles mais se trouvent en surface (Corbaz, 1990).

II.1.5. Deutéromycètes

Les deutéromycètes, ou champignons incomplets, sont caractérisés par un mycélium septé et regroupent tous les champignons dont on connaît que la phase végétative ou qui n'ont pas de phase sexuée (Doucet, 2008).

II.2. Les principaux genres de champignons telluriques phytopathogène

Parmi les genres des champignons telluriques qui sont capables d'infecter les racines de plantes sauvages ou cultivées et de causer des dégâts importants, on trouve *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Alternaria*, *Pythium*, *Verticilium*, *Botrytis*... (Agris, 2005). Ils sont la cause principale des maladies telluriques et sont responsables d'environ 70% des maladies des plantes cultivées (Deacon, 2006).

II.2.1. Genre *Aspergillus*

II.2.1.1. Généralités

Ce genre de champignons pathogène est affilié à la classe des Ascomycètes. Le thalle, hyalin ou chloré présente un mycélium cloisonné portant de nombreux conidiophores dressés et terminés en vésicules (Raper et Fennell, 1965). Il existe actuellement environ 185 espèces d'*Aspergillus* réparties en 18 groupes.

Les *Aspergillus* ont une large répartition géographique mais sont généralement trouvés dans les endroits à climat chaud (Castegnaro et Pfohl, 2002) ; ils se développent sur la matière organique en décomposition dans le sol, céréales...

Ce champignon pousse rapidement sur les milieux de culture classiques. Après incubation, les colonies de différentes couleurs selon les espèces (brun, vert, jaune ou noir) vont apparaître. La plupart des *Aspergillus* croît à une température comprise entre 22 et 25°. (Badillet et al., 1987 ; Morin, 1994). Les colonies formées par *Aspergillus* sont souvent poudreuses ou granuleuses.

Le genre *Aspergillus* se caractérise par la formation d'un organe reproducteur asexué : la tête d'*Aspergillus*. Une vésicule globulaire se forme à l'extrémité, à partir de laquelle les phialides se forment directement ou par sous-sections (Rouvière, 2002).

II.2.1.2. Potentiel toxigène

Il existe plusieurs espèces appartenant au genre *Aspergillus* sont connues pour leur pouvoir à produire certaines mycotoxines (Pitt, 2000).

Aspergillusterreux produit des substances antibactériennes de toxicité différente (flavine, terreine, citrinine, erdine et molécules apparentées, calavacine) (Botton et al., 1990).

Aspergillus flavus et *Aspergillus parasiticus* sont les principaux fabricateurs d'aflatoxines. L'aflatoxine B1 est connue comme substance cancérogène pour l'homme et l'animal (Iarc, 1993). *Aspergillus fumigatus* produit quelques métabolites très toxiques comme la fumagiline,

L'acide helovlique, la gliotoxine, des alcaloïdes voisins de ceux de l'ergot de seigle (Moreau, 1982).

Aspergillus niger synthétise l'acide oxalique (Raistrick et Clark, 1919), des Malformines, et certaines souches synthétisent des aflatoxines.

Aspergillus ochraceus est le principal fabricant d'ochratoxine A. Il colonise un nombre important de substrats (Ramos et al., 1998).

II.2.2. Genre *Penicillium*

II.2.2.1. Généralités

Ce genre regroupe des mycètes filamenteux appartenant à la classe des Ascomycètes. Le *penicillium* comprend environ 227 espèces reconnues d'après les caractères du thalle, des pénicilles et des spores (Pitt, 1988).

Les *penicilliums* sont des mycètes polyphages pouvant être la cause de nombreuses dégradations. Le sol, les céréales, les denrées alimentaires et autres sont l'habitat naturel des *Penicillium*. Cette moisissure est courante dans les climats tempérés (Tabuc, 2007).

Ce genre est caractérisé par son organisation en pinceau. Le thalle, constitué de filaments mycéliens septés et hyalins, porte des conidiophores lisses ou granuleux, simples ou ramifiés qui se terminent par un pénicille. Les conidiophores peuvent être séparés ou regroupés en faisceaux lâches ou agrégés en corémies bien individualisés (Anani et Bentaleb, 2016).

II.2.2.2. Potentiel toxogène

La plupart d'espèces qui appartenant au genre *Penicillium* ont une capacité de produire des mycotoxines : l'acide cyclopiazonique produit par l'espèce *Penicillium chrysogenum*, l'acide pénicillique synthétisé par l'espèce *Penicillium cyclopium*, la

patuline ou la clavacine produit par *Penicillium expansum* et *Penicillium griseofulvum*, la citrinine et l'ochratoxine A sont synthétisées par les espèces *Penicillium expansum* et *Penicillium verrucosum* par ordre (Pitt, 2000).

II.2.3. Genre *Botrytis*

II.2.3.1. Généralité

Le genre *Botrytis* comprend 22 espèces, ou la plupart ont un spectre d'hôtes limité comme *Botrytis* sur les haricots. En revanche, *Botrytis cinerea* a une aptitude d'attaquer plus de 230 espèces de plantes, causant de graves dommages à ces plantes avant et après la récolte. Ce champignon appartient à la classe des *Deutéromycètes* de la famille *Candida*. La forme délibérée appartient au phylum *Ascomycota*, la classe *Ascomycota*, ordre des *Leotiales*, *Sclerotinaceae* (Jarvis, 1977).

Botrytis cinerea est un mycète que l'on peut trouver dans des terroirs étendus et variés très polyphage et opportuniste qui colonise plus facilement les tissus fragilisés (Blancard et al., 2003). Le mycélium fongique, vu au microscope, se révèle être composé de grappes au cours de son développement le grand tube se ramifie en forme d'arbre au sommet. Lorsque le développement du moule est assez avancé, on voit de très nombreux amas formés à la fin conidies ; des spores ovoïdes sont isolées de ces conidies.

II.2.3.2. Le potentiel toxigène

Botrytis cinerea a l'aptitude de produire de nombreuses enzymes qui jouent un rôle dans sa toxicité, en particulier les pectinases qui dégradent la pectine, un polysaccharide majeur de paroi cellulaire végétale. Les enzymes pectinolytiques sont sécrétées par les agents pathogènes en contact des cellules végétales. Autres enzymes telles que les cellulases, les xylanases et les protéases sont également libérées mais uniquement lorsque la pectine pariétale est suffisamment dégradée (Le Pepper, 2003).

II.2.4. Le genre *Fusarium*

II.2.4.1. Généralités

Dans ce genre, on trouve des champignons imparfaits classés dans la classe des deutéromycètes. Les espèces de *Fusarium* appartenant à la classe des Ascomycètes sont des formes parfaites ou télémorphes. Le genre de *Fusarium* comprend près de 40 espèces largement répandues (Nelson et al., 1983).

Fusarium est caractérisé par la présence de macroconidies fusiformes et cloisonnées. Les conidiophores souvent très ramifiés produisent sur le thalle des coussinets et portent des masses de spores (Tabuc, 2007).

II.2.4.2. Le potentiel toxigène

Le genre *Fusarium* regroupe des espèces ayant une capacité de produire de nombreuses mycotoxines.

Les espèces *Fusarium poae*, *F. sporotrichioides*, *F. culmorum*, *F. crookwellense* et *F. graminearum* synthétisent des trichothécènes de type A et B. Les deux espèces *F. verticillioides* et *F. proliferatum* produisent des fumonisines. La zéaralénone est produite par les espèces *F. culmorum*, *F. oxysporum* et *F. sporotrichioides* (Pitt, 2000).

II.3. Les maladies fongiques des plantes

Les champignons phytopathogènes sont responsables de nombreuses maladies chez les plantes, ils sont à l'origine des maladies cryptogamiques et sont la cause de près de la moitié des maladies connues à ce jour chez les plantes cultivées (Lepoivre, 2003).

Aujourd'hui, le nombre d'espèces fongiques par rapport aux organismes vivants est de 1,5 millions, parmi ces espèces, 10% seulement sont décrites dont 10 000 sont responsables des maladies chez les végétaux et parfois même chez l'Homme et l'animal (Nasraoui, 2008).

Les maladies causées par les champignons (maladies fongiques) sont facilement transmises par la pluie et le vent qui aident et favorisent le transport des spores des champignons phytopathogènes (Brouillard, 2013).

Les champignons du sol détruisent les tissus de l'hôte par des enzymes et des toxines, ils sont capables d'infecter n'importe quel tissu à n'importe quel stade de croissance des plantes (Agrios, 2005).

II.3.1. Définition des maladies des plantes

Suite à une infection par un agent pathogène, la plante subit un déséquilibre dans les actions métaboliques des organes végétatifs. Ceci permet de définir la maladie des plantes comme un état phénotypique anormal qui présente des anomalies appelés les symptômes par rapport au phénotype normal attendu, et qui réduit la croissance de la plante.

Les symptômes des maladies des plantes représentent essentiellement des changements de couleurs, des altérations d'organe, des modifications anatomiques et des altérations du métabolisme. On distingue deux type de la maladie : les maladies parasitaires est non parasitaires (Semal et Lepoivre, 2003).

Les maladies des plantes résultent souvent de l'interaction de trois facteurs, les suivants : a- un agent causal de la maladie (organisme pathogène) ; b- une plante hôte sensible (hôte susceptible) et c- des conditions de l'environnement favorables, dont l'interaction entre ces trois facteurs formant un triangle appelé « le triangle de la maladie » (Nasraoui, 2008).

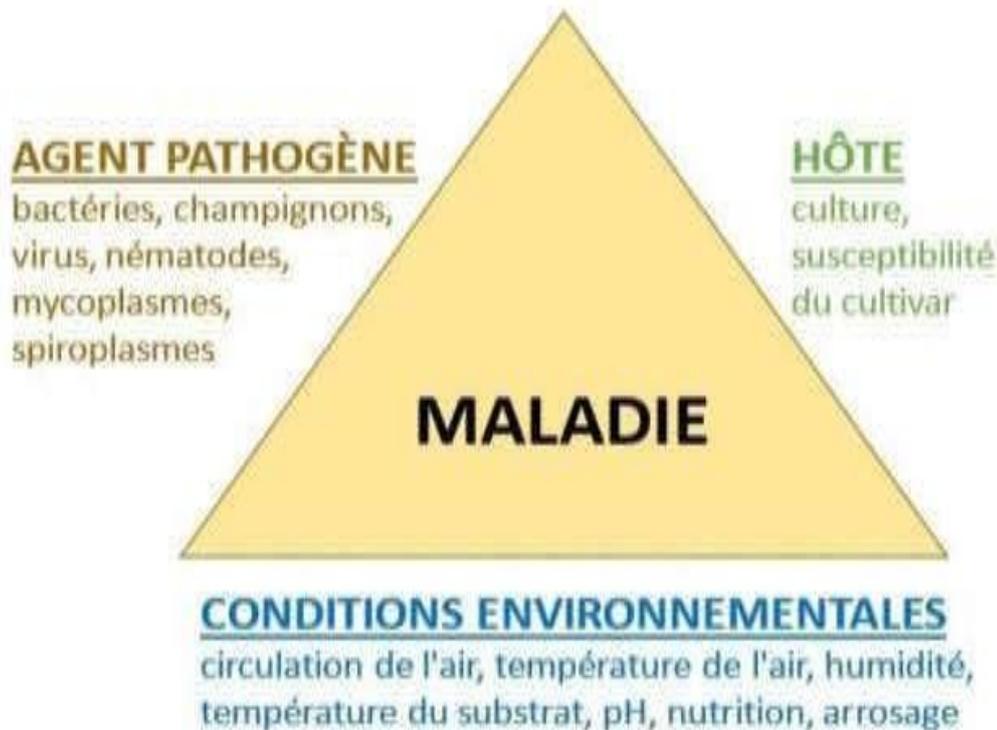


Figure 1 :Le triangle de la maladie (Buechel, 2021)

II.3.2. Les maladies non parasitaires

Elles sont dues à l'action des agents externes non vivants (climat, sol...), et elles résultent de l'action défavorable d'un ou de plusieurs facteurs du milieu ambiant (inadéquation des conditions écologique). Il peut s'agir de phénomènes de pollution ou des problèmes nutritifs et de toxicité des pesticides (Paul Et Impens, 2003).

II.3.3. Les maladies parasitaires

Elles sont causées par l'action des agents pathogènes parasites (virus, champignons, bactéries...etc). Les agents parasites sont généralement infectieux (ils envahissent l'hôte et s'y multiplient) et contagieux parce qu'ils se transmettent d'une plante à autre (Lepoivre, 2003).

II.3.4. Les étapes de développement des maladies

Une série d'événements, plus ou moins observés et distincts dans chaque maladie infectieuse, qui conduisent au développement de la maladie. Cette série d'événements est appelée « le cycle de la maladie ». il s'agit de contact, de la pénétration, de l'infection, de la dissémination et de la conservation du pathogène (Nasraoui, 2008).

II.3.4.1. Le contact

Cette étape est appelée « inoculation », c'est le premier contact entre l'agent pathogène et la plante hôte. L'inoculum peut être un mycélium, une spore...etc.

Il se trouve généralement dans les débris de la plante hôte, dans le sol, dans /sur les semences...etc. Il est transporté par l'air, l'eau et les insectes à partir d'un champ voisin ou éloigné.

Il existe plusieurs types d'inoculum, les plus importants sont :

- L'inoculum primaire qui provoque une infection primaire ;
- L'inoculum secondaire résultant de l'infection primaire (Nasraoui, 2008).

II.3.4.2. La pénétration

Le fragment mycélien ou la spore en germination pénètre dans la plante directement par les ouvertures naturelles ou par les blessures.

La pénétration directe c'est la voie la plus utilisée par les champignons, où elle exploite cette voie pour pénétrer en formant des filaments très petits désignés (hyphes) ou à travers un organe de fixation appelé l'appressorium (Nasraoui, 2008).

II.3.4.3. L'infection

Elle commence quand l'agent pathogène se fixe et s'installe dans les cellules de la plante hôte et la satisfaction de ces besoins nutritionnels pour qu'il survive. Ainsi, le pathogène se développe et se multiplie de façon à envahir la plante hôte plus ou moins

rapidement. Des symptômes sur le plan interne et externe vont apparaître. La période entre l'inoculation et l'apparition des premiers symptômes est appelé « incubation ».

Certains champignons pathogènes pendant l'infection tuent les cellules ensuite, utilisent leur contenus dits « nécrotrophes », d'autres dits « biotrophes » obtiennent leur nourriture à partir des cellules vivantes sans les tuer (Nassraoui, 2008).

II.3.4.4. Dissémination

Ceci représente le déplacement de l'agent pathogène ou une partie de ses formes de reproduction (tel que la spore) de l'origine d'infection vers d'autres hôtes sains dans le voisinage ou vers d'autres régions exemptes d'infection. On distingue plusieurs voies de dissémination, les plus importantes sont l'eau, le vent, les insectes et d'autres animaux et l'homme (Nassraoui, 2008).

II.3.4.5. Conservation

Quand les conditions de l'environnement deviennent défavorables où la plante arrive à la fin de son cycle végétatif, les agents pathogènes passent par une période de dormance à travers plusieurs manières sous forme de mycélium ou de conidies pour les champignons. L'agent pathogène reprend son activité et renouvelle l'infection quand les conditions de l'environnement deviennent favorables (Nassraoui, 2008).

II.4. Principaux maladies fongiques des plantes

II.4.1. Cloque de pêcher

La maladie est causée par le champignon pathogène *Taphrina deformans* qui attaque principalement les pêches, c'est un parasite facultatif des pêches. Les symptômes caractéristiques de cette maladie sont la déformation et l'altération des couleurs du feuillage et sa chute au début de l'été. Elle sévit dans de nombreuses régions tempérées du monde. Cette maladie est monocyclique et une infection des tissus foliaires en développement est son initiation au printemps (Safran et Levy, 1995).



Figure 2 :Feuille d'arbre atteinte de cloque de pêcher causé par le champignon *Taphrina deformans* (Vechambre, 2014)

II.4.2. Graphisme de l'orme

La maladie hollandaise de l'orme est causée par deux champignons pathogènes *Ophiostoma ulmi* et *Ophiostoma novo-ulmi*, les plus virulents. Le champignon se développe dans les vaisseaux conducteurs de la sève. La maladie est transmise via des insectes du groupe des scolytes. Les ormes infectés par ce parasite présentent des symptômes externes tels que le brunissement et flétrissement des feuilles ainsi qu'une coloration brune-rouge observable sous l'écorce. Cette maladie se développe jusqu'à la morte de la plante (Pauline, 2021).



Figure 3 : Un arbre atteint de la maladie hollandaise de l'orme

II.4.3. Helminthosporiose

La maladie de helminthosporiose touche différentes cultures (maïs, riz, orge...) par divers champignons pathogènes. Le helminthosporiose d'orge est une maladie foliaire causée par l'ascomycète *Drechslera teres*. Les symptômes présentés sur l'orge apparaissent sous forme des taches brunes réticulées observées sur les feuilles. Cet ascomycète est généralement virulent (Backes, 2021).



Figure 4 : Helminthosporiose de l'orge causé par *Drechslera teres*. (Ouedraogo 2008).

II.4.4. Pourriture grise

La pourriture grise est une maladie qui peut se développer sur différentes espèces de plantes. Elle est causée par un champignon pathogène qui peut se développer très rapidement *Botrytis cinerea*, ce pathogène est un champignon polyphage vivant comme saprophyte sur certaines cultures des plantes. La pourriture grise peut provoquer des symptômes de dépérissement sur diverses parties aériennes de la plante et hiverne en tant que saprophyte sur tous les organes de la vigne et sur des débris végétaux sur lesquels elle forme des sclérotés (Viret et Siegfried, 1995).



Figure 5 : Pourriture grise sur chasselas causée par *Botrytis cinerea* (Ajouz, 2009)

II.4.5. Mildiou

Cette maladie est causée par un agent pathogène eucaryote filamenteux *Phytophthora infestans*. Cet oomycète peut attaquer différentes espèces de plantes. Ce champignon pathogène attaque les feuilles et entraîne l'apparition de taches jaunes aqueuses de forme différente qui brunissent. Par la suite, les tiges seront aussi attaquées avec l'apparition des taches brunes. La maladie peut se développer rapidement et provoque



la mort de la plante (Fernandez-acero, 2014).

Figure 6 : Tomates atteintes de mildiou causé par le champignon *Phytophthora infestans* (Aydi, 2013)

II.4.6. Moniliose

La maladie est causée par le champignon *Monilia fructigena*, elle affecte les fruits de divers arbres fruitiers (poiriers, pruniers, pêchers...). Elle se manifeste sous forme de



stries de concentriques du mycélium qui se développe autour du point.

Figure 7 : Un fruit atteint de la moniliose causé par *Monilia fructigena* (Lecomte, 2011)

II.5. Les relations plante- pathogènes

D'une façon globale, les plantes mettent en jeu des mécanismes très efficaces qui contrôlent et arrêtent leurs rapports avec les agents pathogènes (champignon pathogène).

Alors on distingue deux réactions plante-pathogène classiquement connues (Lepoivre, 2003).

II.5.1. La relation non-hôte

La réaction non- hôte (résistance basale) qui est déclenchée par des récepteurs généraux trouvés sur la membrane des plantes et qui ont une aptitude de reconnaître des signaux moléculaires commun aux agents pathogènes ou aux microbes. Cette réaction réduit des symptômes mais ne suffit pas pour limiter le développement de l'agent pathogène et de la maladie (Adam, 2008).

Les plantes sont des « non- hôte » vis-à-vis de la majorité des microorganismes de leur environnement. Elles ne sont attaquées que par un chiffre limité de microorganisme (Rocher, 2004).

II.5.2. La relation hôte

Cette réaction dite aussi résistance spécifique, immunité déclenchée par des effecteurs (ETI pour Effector-Triggered Immunity). La relation hôte est basée sur le concept gène pour gène (Flor, 1971).

On parle de «résistance hôte » lorsqu'une espèce végétale est sensible à un pathogène mais certaines souches de cette espèce végétale résistent à certaines souches du pathogène, donc, il s'agit d'une variété qui a acquis des gènes de résistance.

Cette façon de défense est caractérisée par deux types de réponses défensives inductibles qui se succèdent après l'infection initiale. La première est la réponse hypersensible ou HR. La deuxième est la résistance systémique acquise ou SAR (Adam, 2008).

Le développement d'une maladie fongique et ses symptômes sont étroitement liés aux relations qui s'établissent entre la plante et son parasite. La plante dite sensible si l'agent pathogène ne réveille pas les mécanismes de défense de la plante, il s'y installe pour croître. Contrairement, il y a certaines végétales dites résistantes, répondent rapidement à la tentative d'invasion et sont épargnées. Cette propriété est beaucoup utilisée pour sélectionner des variétés résistantes (Mazoyer, 2002).

Chapitre III
La lutte biologique

III.1. La lutte biologique

Les maladies des plantes doivent être contrôlées pour maintenir la qualité et l'abondance des denrées alimentaires, des aliments pour animaux et des fibres produits par les agriculteurs du monde entier (Pal, 2006). Différentes approches peuvent être utilisées pour prévenir, atténuer ou contrôler les maladies des plantes. Parmi les moyens de lutte contre ces maladies en trouvera la lutte biologique. Dans la pratique, la lutte biologique contre les ravageurs est connue depuis plus d'un siècle dans son concept scientifique et plusieurs efforts ont été fournis pour développer cette méthode de lutte contre les ravageurs (Hoffman et al, 1994). Cette technique est utilisée depuis les balbutiements de l'agriculture pour protéger les cultures contre des agresseurs causant de grosses pertes de récolte, (Lydie, 2010).

III.1.1. Définition

Les définitions publiées sur le biocontrôle diffèrent en fonction de la cible, du nombre, du type et de la source des agents biologiques, ainsi que du degré et du moment de l'intervention humaine. De manière générale, la lutte biologique est la suppression des activités nuisibles d'un organisme par un ou plusieurs autres organismes, souvent appelés ennemis naturel, autrement dit c'est l'utilisation d'un organisme auxiliaire (Grisson, 1991) pour contrôler d'autres organismes nuisibles. Une autre définition plus large est donnée par d'autres auteurs « Toute action mettant en jeu des organismes modifiant l'hôte, y compris les méthodes culturales qui permettent de diminuer, par voie directe ou indirect, les dommages causés par un parasite » (Gorbaz, 1990).

En 1964, De Bach a défini la lutte biologique comme suit « les actions des parasites, des prédateur et des agents pathogènes visant à maintenir la densité d'un autre organisme à un niveau inférieur à celui qui serait atteint en leur absence ».

Van Driesche et Bellows (1996) ont proposé une définition générale de la lutte biologique : « la lutte biologique est un processus agissant au niveau des populations et par lequel la densité de la population d'une espèce est abaissée par l'effet d'une autre espèce qui agit par prédation, parasitisme, pathogénicité ou compétition ». Il existe de nombreuses définitions de la lutte biologique mais le but de cette technique est le même.

III.1.2. Historique

L'origine de l'agriculture remonte à la période Néolithique (10000 à 8000 avant Jésus christ). Ces pratiques ont entraîné une concentration des ressources et une réduction des ennemis naturels par changement de l'environnement local. De plus, il est aussi rapidement devenu indispensable de stocker les récoltes au fur et à mesure de l'extension des villages et des villes. Ce développement dans le domaine de l'agriculture est également accompagné de la nécessité d'utiliser des techniques empiriques pour protéger les cultures et les élevages (Suty, 2010). La première utilisation référencée de la lutte biologique a été effectuée par les Chinois, dans les environs de l'an 304 avant Jésus-Christ. Dans les vergers d'agrumes, les agriculteurs utilisaient des fourmis tisserandes (*Oecophylla smaragdina Fabricius*) indigènes qui consommaient une variété de ravageurs pour protéger les fruits. Comme les fermiers favorisaient également la dispersion de ces fourmis en installant des tiges de bambou entre les arbres, il s'agissait de lutte biologique à la fois et l'augmentation et de protection (Lambert, 2010).

Des recherches sur les prédateurs, parasitoïdes et des maladies s'attaquant aux ravageurs jalonnent l'histoire, mais c'est surtout vers la fin du et a XIXème ou XXème siècle que les principales découvertes et expériences se sont installées. En 1868, la cochenille australienne (*Icerya purchasi Maskell*), un insecte parasite qui suce la sève des arbres d'agrumes, a été accidentellement introduite en Floride. Suite aux dommages considérables à l'industrie et en l'absence d'autres moyens de lutte, un entomologiste introduisit une coccinelle naturellement prédatrice (*Rodolia cardinalis Mulsant*) de la cochenille en Australie, ce qui mena au premier grand succès de la lutte biologique classique. Les scientifiques croient alors que la lutte biologique est la solution à tous les problèmes et de nombreux insectes sont introduits en Amérique de façon maladroites, sans études préliminaires sérieuses ni période de quarantaine. Heureusement, aucun de ces organismes n'a causé de tort sérieux à l'environnement (Jourdheuil *et al*, 1991).

Des succès notables ont été observés, mais aussi de nombreux échecs à l'arrivée de DDT(Dichloro Diphenyl Trichloroéthane) en 1939, le biocontrôle a été boudé au profit de la lutte chimique. Depuis 1955 suite à la prise de conscience des problèmes liés à l'utilisation des produits chimiques, il y a eu réflexion pour la mise en place des techniques de protection des cultures associant différents moyens basés sur la lutte biologique (Resche- Rigon, 2008).

III.2. Les organismes utilisés en lutte biologique

En pratique, plusieurs organismes utilisés comme agents de lutte, ces organismes nommés aussi les auxiliaires de lutte (Lambert, 2010). Les auxiliaires utilisés le plus souvent sont les microorganismes (bactéries, champignons, virus...), les insectes, les arachnides et les nématodes. Ces organismes utilisés doivent avoir une bonne capacité d'adaptation, un bon taux de reproduction et leur cycle de vie doit être synchronisé du ravageur (Weeden et *al.*, 2007).

III.2.1. Les bactéries et la lutte biologique

Plusieurs auteurs ont démontré l'importance de l'activité antibiotique des bactéries dans la réduction de la gravité des maladies d'origine tellurique (Howell et Stipanovic, 1979). Aujourd'hui, *Bacillus thuringiensis* et *Bacillus sphaericus* sont les espèces les plus utilisées dans la lutte contre les ravageurs (Kouassi, 2001). Vers le milieu des années 1970, *Bacillus thuringiensis* est appliquée en lutte contre les lépidoptères défoliateurs dans les forêts et certains papillons parasites des grandes cultures notamment le maïs (Bounoua, 2008). La lutte biologique est mieux contrôlée grâce à un antagoniste bactérien qui interagit directement avec l'agent pathogène et/ou indirectement c'est à dire avec la plante-hôte (Tomashow, 1996 ; Benhamou et *al.*, 2002). Les biopesticides produits à par les bactéries représentent 74% du marché mondial (Thakore, 2006). Ces substances ont une capacité d'envahir le système racinaire et influencent de façon bénéfique la plante en stimulant sa croissance et/ou en la protégeant contre les infections avec des agents phytopathogènes, ces bactéries nommées PGPB (Plant Growth Promoting Bacteria : bactéries promotrices de la croissance des plantes). La plupart des bactéries utilisées comme biopesticide appartiennent aux genres *Bacillus*, *Pseudomonas* et *Agrobacterium* (Adam, 2008). Plusieurs genres bactériens sont des agents de biocontrôle antifongique (Mc Loughlin et *al.*, 1992), les bactéries les plus utilisées sont : *Pseudomonas fluorescens*, *P. putida*, *Erwinia herbicola*, *Bacillus subtilis* et *Enterobacter cloacae*.

Tableau 1: Agents de biocontrôle utilisés pour la lutte contre les agents phytopathogènes (Errakhi, 2008)

| Agents de biocontrôle | Agents phytopathogènes cibles | Mécanisme d'action |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <i>Trichoderma harzianum</i> | <i>Roselliniana spp.</i> | Parasitisme |
| <i>Trichoderma koningii</i> | <i>Sclerotium rolfsii</i> | Parasitisme |
| <i>Pseudomonas spp</i> DF-41 et PA-2 | <i>Sclerotinia Sclerotiorum</i> | Antibiose |
| <i>Streptomyces sp.</i> Di-94 | <i>Rhizoctonia solani</i> | Antibiose |
| <i>Streptomyces sp.</i> 93 | <i>Pythium, Aphanomyces, Phytophthora, Rhizoctonia et Fusarium spp.</i> | Antibiose |
| <i>Pseudomonas aeruginosa</i> | <i>Aspergillus flavus, A. niger, Rhizoctonia bataticola, Rhizoctonia solani, Sclerotium rolfsii et Puccinia arachidis</i> | Antibiose Compétition |
| <i>Streptomyces diastatochromogenes</i> PonSSII | <i>Streptomyces scabies</i> | Antibiose Compétition |
| <i>Pseudomonas spp.</i> | <i>Gaeumannomyces graminis var. tritici, Pseudomonas tolaasii, Fusarium oxysporum, f. sp. Lini et Erwinia amylovora</i> | Antibiose Compétition |
| <i>Trichoderma spp.</i> | Plusieurs champignons phytopathogènes | Parasitisme Antibiose Compétition |
| <i>Bacillus subtilis</i> | <i>Fusarium sp</i> | Antibiose |

III.2.2. Mécanismes d'action des agents de lutte biologique

III.2.2.1. Compétition pour l'espace et les nutriments

Dans certains cas, une réduction de la maladie des plantes peut être associée à une colonisation importante des racines par les bactéries bénéfiques, ce qui baisse le nombre de microorganismes pathogènes et donc, leur croissance (Piano et *al.*, 1997). Le PGPR doit être présent sur les racines en nombre important pour avoir un effet bénéfique et être capable de créer une compétition pour les nutriments dans la rhizosphère (Haas et Defago, 2005). Pour être un bon compétiteur, un agent antagoniste doit être capable d'utiliser rapidement et efficacement les éléments nutritifs présents en faible concentration sur les organes de la plante (Jijakli, 2003). La vitesse de croissance intrinsèque joue également un rôle très important, les autres propriétés renforçant le potentiel colonisateur d'une souche sont la mobilité (présence d'un flagelle) (Jofre et *al.*, 2004), le chimiotactisme et la capacité d'utilisation des composés excrétés par les racines en tant que sources de carbone et d'azote (Berggren et *al.*, 2001 ; Gupta, 2003).

La capacité d'une bactérie à inhiber un agent pathogène fongique semble dépendre de l'application d'un inoculum élevé des microorganismes par rapport à l'agent pathogène. Pour rendre cette approche pratique, il est nécessaire de sélectionner ou de développer des souches qui peuvent être appliquées en faible nombre mais qui se multiplient rapidement dans l'environnement (Stephens *et al.*, 1993).

Un autre aspect important de la compétitivité d'un PGPR est sa capacité à persister et à se proliférer. Cependant, il est souvent difficile de prévoir le comportement d'un PGPR dans l'environnement. L'endurance d'une bactérie, dans le sol, peut être influencée par un certain nombre de facteurs biotiques et abiotiques, notamment la composition du sol et la température (Bashan et al, 1995). Il est également important que les souches puissent utiliser une source inhabituelle de carbone ou d'azote telle que l'Acide 1-aminocyclopropane-carboxylique ou Aminocyclopropane-1-Carboxylate (l'ACC) ou un composé xénobiotique (un herbicide ou un pesticide) mais devrait se proliférer et persister longtemps dans les sols contenant ces composés inhabituels. Ainsi, la capacité de certaines PGPRs hydrolysant l'ACC, un composé se trouvant naturellement dans les exsudats racinaires, peut fournir à ces souches un avantage concurrentiel par rapport aux autres microorganismes de la rhizosphère (Jacobson et *al.*, 1994; Glick et *al.*, 1994a, 1994b, 1995).

III.2.2.2. Aminocyclopropane-1-Carboxylate (ACC) désaminase

Certains PGPRs produisent de l'ACC-désaminase, une enzyme qui pourrait cliver l'ACC, le précurseur immédiat de l'éthylène dans la voie de biosynthèse de l'éthylène chez la plupart sachant que l'activité de l'ACC-désaminase diminuerait la production d'éthylène et favoriserait un allongement des racines.

Les PGPRs produisant cette enzyme soulageraient ainsi la plante de plusieurs stress causés par les infections (Glick et *al.*, 1998).

III.2.2.3. Compétition pour le fer et production de sidérophores

Un cas particulier de la compétition pour les nutriments est celui de la compétition pour le fer. Certaines bactéries ont une capacité de produire des sidérophores. Ces derniers captent le fer et le rendent ainsi non disponible pour l'agent pathogène, ce qui conséquemment limite sa croissance. Ce mécanisme est souvent attribué aux agents antagonistes de l'espèce *Pseudomonas fluorescens* (Corbaz, 1990).

Le fer est l'un des minéraux les plus abondants dans le sol mais il est indispensable pour l'assimilation directe par les microorganismes, parce que l'ion ferrique (Fe^{+3}), la forme prédominante dans la nature, est peu soluble (Neilands et *al.*, 1987). La quantité de fer soluble dans le sol est beaucoup trop faible pour assurer la croissance microbienne, les microorganismes du sol sécrètent des molécules de faible poids moléculaire (400-1000 dalton) appelés sidérophores (Castignetti et Smarrelli, 1986) (du grec pherein et sideros signifiant «porter le fer») qui sont capables de chélater, avec une très haute affinité, le fer ferrique Fe^{+3} et le transportent vers la cellule microbienne où il est repris par l'intermédiaire d'un récepteur cellulaire puis utilisé durant la croissance microbienne (Neilands et Leong, 1986 ; Briat, 1992). Les complexes sidérophore- Fe^{3+} sont ensuite récupérés par la bactérie grâce à des transporteurs membranaires spécifiques. Dans la bactérie, la dissociation du fer de son chélateur nécessite en général une réduction du Fe^{3+} en fer Fe^{+2} (le sidérophore ayant une plus forte affinité pour la forme ferrique Fe^{+3}). Tandis que, les champignons phytopathogènes synthétisent également des sidérophores, mais ont généralement une plus faible affinité pour le fer par rapport à ceux produits des PGPRs (Schippers et *al.*, 1987).

Contrairement aux agents pathogènes microbiens des plantes, les plantes ne sont généralement pas endommagées en raison de l'épuisement du fer dans le sol. La plupart

des plantes peuvent pousser à des concentrations beaucoup plus faibles (environ 1000 fois) (O'Sullivan et O'Gara, 1991).

Les bactéries capables de synthétiser les sidérophores sont : *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter* (Ahmad et al., 2008). Les bactéries ayant un grand pouvoir de chélation du fer peuvent reconnaître et utiliser les sidérophores produits par d'autres souches, alors que ces dernières ne sont pas capables d'utiliser le sidérophore qu'elles produisent. Cette particularité peut favoriser la souche dans le processus de la colonisation et la compétition pour le substrat mieux que d'autres microorganismes de la rhizosphère (Ongena et al., 2002).

La capacité des sidérophores à agir comme agents efficaces dépend de la plante cultivée, du phytopathogène spécifique à supprimer, de la composition du sol, de la bactérie productrice, et de l'affinité du sidérophore spécifique pour le fer. Ainsi, même si un PGPR est un agent efficace suppresseur du pathogène dans des conditions contrôlées, son comportement sur le terrain est extrêmement difficile à prédire. Malgré cela, cette mise en garde suppose que la capacité des bactéries produisant des sidérophores inhibant les organismes phytopathogènes est un trait important qui pourrait avoir un impact agronomique important (Ahmad et al., 2008).

III.2.2.4. Antibiose

L'antibiose est probablement le mécanisme le plus connu et peut-être le plus utilisé par les PGPRs pour limiter l'invasion des pathogènes dans les tissus de la plante hôte. Elle consiste en une inhibition directe de la croissance du pathogène via la production des métabolites aux propriétés antifongiques et/ou antibiotiques (Dong et al., 2002).

La sécrétion de substance antibiotique par les microorganismes est un phénomène fréquent. Certains métabolites sont capables de chevaucher avec la germination, la croissance mycélienne et /ou la sporulation des agents phytopathogènes. D'autres entraînent la libération des composés cellulaires suite à la perturbation de la perméabilité cellulaire. L'antibiose est le mode d'action le plus étudié chez les auxiliaires de la lutte biologique (Jiakli, 2003). Cette dernière consiste en la production d'antibiotiques efficaces, par l'agent antagoniste, contre l'agent pathogène (Corbaz, 1990), la croissance de l'agent pathogène va s'arrêter ou se réduire par ces antibiotiques.

La fonte des semis du coton due à *Pythium ultimum* peut être combattue par un enrobage des semences avec la souche de *P. fluorescens* PF 5. Cette souche produit un antibiotique « la polyulutérine ». La fonte des semis est ainsi réduite de façon significative aussi bien par l'utilisation de ce *Pseudomonas* comme agent d'enrobage que par l'utilisation de l'antibiotique purifié (Howell et Stipanovic, 1980).

III.2.2.5. Composés volatiles

Certaines rhizobactéries produisent des métabolites secondaires comme l'acide cyanhydrique (HCN). Bien que le cyanure soit un inhibiteur métabolique général, il est aussi synthétisé, excrété et métabolisé par certains organismes y compris les bactéries par la voie de décarboxylation oxydative en utilisant la glycine, le glutamate ou la méthionine comme précurseurs (Castric, 1977 ; Curl et Truelove, 1986). Son rôle est d'éviter la prédation ou la compétition. (Heydari et al., 2008). La production de HCN est une activité commune chez *Bacillus* (50%) dans le sol rhizosphérique (Ahmad et al., 2008).

D'autres composés volatiles, le 2,3 butanediol et l'acétoïne libérés par les PGPRs entraînent une amélioration appréciable de la croissance de la plante en induisant sa résistance aux différentes maladies (Ryu et al., 2003).

III.2.2.6. Induction des systèmes de résistance de la plante hôte

La lutte biologique par des microorganismes peut induire une résistance induite systémique (ISR) dans la plante hôte qui peut provoquer la future invasion d'agents pathogènes (Jijakli, 2003). L'induction des systèmes de résistance chez la plante a été démontrée pour la première fois par Kempe et Sequira (1983). Ils ont remarqué que le prétraitement avec des bactéries peut protéger des tubercules de pomme de terre infectés par *Pseudomonas solanacearum*.

Les microorganismes antagonistes peuvent être occupés par la même niche écologique que le pathogène. L'induction du système de résistance est manifestée comme un changement dans la composition de la paroi cellulaire ou la libération de l'extrait. Ce sont des substances qui activent le mécanisme de défense des plantes. Cela produira des phytoalexines et des protéines « PR » qui lui confèrent une résistance systémique (Agrios, 1988 ; Toussaint, 1996). Par exemple, *Trichoderma harzianum* T-203 induit des changements structurels et chimiques dans la paroi cellulaire des plantes qui augmentent leur résistance à l'infection par les phytopathogènes (Brimner et Boland, 2003).

L'expression phénotypique de phénomène d'ISR peut être divisée en quatre étapes principales :

- Perception par la plante des molécules bactériennes responsables d'élicitation du phénomène ;
- Transmission de signal nécessaire à la systémisation du phénomène dans la plante ;
- Mise en alerte de la plante au niveau systémique qui dans la plupart des cas, n'est pas accompagnée de modifications majeures de l'activité transcriptionnelle avant l'attaque du pathogène ;
- Expression du ou des mécanismes de défenses (Cherif, 2014).

Tableau 2: Diversité des souches bactériennes identifiées comme inducteurs de la résistance systémique chez les plantes et la diversité des pathosystèmes dans lesquels l'ISR est impliquée (Van Loon et Bakker, 2005).

| Espèce | Plante-hôte /pathogène |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Gram négatif :</p> <p><i>Pseudomonas fluorescent</i> (souche WCS17)</p> <p><i>P. aeruginosa</i> (souche 7NSK2)</p> <p><i>Serratiamarcescens</i> (souche 90-166)</p> <p><i>S.Plymuthica</i></p> <p><i>Burkholderia cepacia</i></p> <p><i>Pantoeaagglomerans</i></p> <p><i>Kluyvera cryocrescens</i></p> <p><i>Flavomonas oryzihabitans</i></p> | <p>Cacahuètes/<i>Fusarium</i> ;</p> <p>Arabidopsis/<i>Fusarium</i>, <i>Pseudomonas</i></p> <p>Haricots /<i>Botrytis</i>, <i>colleetotrichum</i> ;</p> <p>Tomate/<i>Botrytis</i></p> <p>Concombre/<i>Colleetotrichum</i>, <i>Pseudomonas</i></p> <p>Tabac/<i>Peronospora</i> ;</p> <p>Arabidopsis/<i>Pseudomonas</i> ;</p> <p>Tomate/<i>virus de lamosaïque</i></p> <p>Tomate /<i>Fusarium</i></p> <p>Tabac/<i>Phytophthora</i></p> <p>Pommier/<i>Erwinia</i></p> <p>Tomate/<i>Cucumovirus</i></p> <p>Concombre/<i>coléoptère</i></p> |
| <p>Gram positives</p> <p><i>Bacillus. Pumilus</i> (souche SE34)</p> | <p>Tabac/<i>Peronospora</i> ;</p> <p>Arabidopsis/<i>Pseudomonas</i></p> <p>Concombre/<i>coléoptère</i> ; Pois/<i>Fusarium</i></p> |

III.2.2.6.1. Déterminants bactériens de l'ISR

Les éliciteurs produits par les rhizobactéries impliqués dans l'ISR sont mal-connus, mais les recherches de ces dernières années ont permis d'identifier plusieurs molécules bactériennes jouant ce rôle (Bakker et al., 2007).

A. Les composants de la surface cellulaire

Les flagelles bactériens sont nécessaires pour la mobilité et l'adhérence des bactéries sur les racines et par conséquent ils sont importants pour une colonisation efficace (Persello Cartieaux et al., 2003). Il a été démontré que la flagelline (protéine du filament flagellaire des *Eubacteria*) des rhizobactéries peut agir comme éliciteur de résistance systémique (Meziane et al., 2005).

Le pouvoir éliciteur des lipopoly-saccharides (LPS) des PGPR varie avec la plante hôte. Par exemple, *P. putida* WCS358 est capable d'induire l'ISR via les LPS chez plusieurs plantes Tels que le haricot, la tomate mais pas chez le radis et *Arabidopsis* (Meziane et al., 2005).

B. Les sidérophores

Les sidérophores produits par les PGPRs dans des conditions de carence en fer, peuvent déclencher l'ISR chez certaines plantes. Les pyoverdines (aussi appelées pseudobactines) et la pyochéline sont des sidérophores synthétisés pour lesquels une activité élicitrice de l'ISR a été démontrée (Bakker et al., 2007; Meziane et al., 2005).

C. Les antibiotiques

Certains composés synthétisés par les PGPRs isolés à l'origine pour leur activité antifongique sont également inducteurs de l'ISR. Ainsi, le rôle dans l'induction de l'ISR par la pyocyanine a été remarqué lors du traitement de plantes de tomate par *P. aeruginosa* 7NSK2 (Audenaert et al., 2002). D'autre part, certaines bactéries à Gram positif comme *Bacillus* spp ont démontré leur capacité à stimuler des mécanismes de défense chez la plante, mais le plus souvent, la nature de leur déterminant provoquant l'ISR n'est pas connue (Kloepper et al., 2004). Jusqu'à présent, les composés volatiles organiques, et plus particulièrement le 2,3- butendiol, sont les seuls déterminants de l'ISR connus chez *Bacillus* (Ping et Boland, 2004).

III.2.2.7. Parasitisme

Ce phénomène se résume à une interaction directe entre deux microorganismes ou des tissus vivants où l'un constitue une base nutritive pour l'autre (Helluy et Holmes, 2005). Via des enzymes secrétées par l'agent antagoniste, ces enzymes lysent les parois cellulaires de l'agent pathogène telles que les protéases, les chitinases, les cellulases et les glucanases.

Les agents de lutte biologique qui utilisent ce mécanisme sont nombreux. *Bacillus subtilis* réduit la population de *Pythium ultimum* et *Rhizoctonia solani* par sécrétion de la glucanase et la protéase (Paulitz et Bélanger, 2001)

III.3. Exemples des bactéries appliquées dans la lutte biologique

III.3.1. Activité de *Pseudomonas fluorescens* dans la lutte biologique

III.3.1.1. Colonisation de la rhizosphère

Cette colonisation est capable d'exercer une protection contre les maladies du sol liée à un processus d'antagonisme, ou comme un préalable à l'expression de facteurs responsables de l'antagonisme (antibiose, stimulation de la résistance).

Ce phénomène de colonisation se déroule en trois étapes :

- Le chimiotactisme, associé aux exsudats racinaires ;
- L'adsorption des microorganismes sur les racines ;
- La colonisation proprement dite de la rhizosphère qui implique la consommation d'exsudats racinaires.
- **La mobilité** : De Weger et al (1987), Scher et al (1988) ont remarqué que la mobilité est nécessaire à la colonisation de la rhizosphère, en observant des mutants de *P. fluorescens* WCS374 dépourvus de flagelles qui sont devenus incapables de coloniser les racines de pommes de terre et de soja respectivement.
- **L'adsorption** : L'agglutination des souches de *Pseudomonas* par les agglutinines des racines est associée à une meilleure colonisation de la rhizosphère (Van Peer et al., 1991). Les pili joueraient un rôle important dans la fixation de *Pseudomonas fluorescens* sur les racines du maïs (Vesper, 1987).

III.3.1.2. Production de substances inhibitrices de la croissance des pathogènes

Pseudomonas fluorescens produit un nombre important de métabolites secondaires (Leisinger et Margraff, 1979) qui pourraient jouer un rôle dans l'effet antagoniste de ces

microorganismes dans le sol. Ces agents inhibiteurs peuvent être subdivisés en 4 groupes : les antibiotiques, les sidérophores, les enzymes et l'acide cyanhydrique (HCN).

A. Les antibiotiques

Plusieurs antibiotiques sont produits par *Pseudomonas fluorescents* et jouent rôle crucial dans l'inhibition des agents phytopathogènes, le 2,4diacetylphloroglucinol (DPG) produit par *P.fluorescens* CHA0 (Haas et al., 1991 ; Keel et al., 1992, 1996) a montré un effet suppressif sur plusieurs phytopathogènes (*G. graminis* et dans *Thielaviopsis basicola*), d'autres antibiotiques sont produits par les *Pseudomonas* dont la pyoluteorine (Maurhofer et al., 1994), Pyrrolnitrine (Rosales et al., 1995 ; Ligon et al., 2000).

B. Les sidérophores

Pseudomonas fluorescents produit également deux types de sidérophores, l'un dit de faible affinité (pyochéline) décelé chez *P.aeruginosa* (Cox et al.1981) et l'autre possède une affinité élevée (pyoverdine ou pseudobactine). La production en quantité importante de ces molécules chélatrices dans le sol permet aux *Pseudomonas fluorescents* de s'approprier de tout le fer nécessaire à leur croissance et de le rendre inaccessible aux autres microorganismes (Viswanathan et Samiyappan, 2004).

C. Les enzymes

La production d'enzymes mycolitiques est également évoquée pour expliquer l'action antagoniste de *Pseudomonas fluorescents* (Lam et al., 1992). Pour une souche de *Pseudomonas stutzeri* (non fluorescent), Lim et al. (1991) ont exhibé que la chitinase et la laminarinase produites par cette souche sont responsables de l'antagonisme *in vitro* observé vis-à-vis de *Fusarium solani*.

D. L'acide cyanhydrique

La production d'acide cyanhydrique (HCN) par la souche de *P. fluorescens* CHA5 est nécessaire à la protection de la plante vis-à-vis de l'agent de la pourriture noire du tabac. Ce mécanisme est de moindre importance pour la souche CHA77 (Haas et al., 1991). L'HCN produit dans la rhizosphère activerait des réactions de défense de la plante, ce qui correspond à un mécanisme indirect de protection.(Voisard et al. (1989)

III.3.1.3. Mécanismes indirects

Il existe des interactions entre *Pseudomonas sp* et les cellules racinaires qui permettent d'augmenter la résistance de celles-ci à l'infection par des microorganismes. La réduction du manganèse par *Pseudomonas fluorescents* pourrait jouer un rôle clé

(Sarniguet, 1990). Cette réduction augmente la quantité du manganèse disponible pour la plante et, par ce biais, conduirait à une meilleure tolérance de cette dernière au parasite. Van Peer et *al.* (1991b) ont révélé que la présence d'une souche de *Pseudomonas sp.* WCS 417r dans la rhizosphère d'œillet induit l'accumulation par les cellules de la plante de phytoalexines présentant une toxicité vis-à-vis de *Fusariumoxysporum*.

III.3.2. Activité des espèces de *Bacillus* dans la lutte biologique

Plusieurs bactéries du genre *Bacillus* ont démontré leur efficacité à réprimer plusieurs agents phytopathogènes de la rhizosphère et de la phyllosphère. Le genre *Bacillus* exerce ses activités antagonistes envers les agents phytopathogènes par différents modes d'action incluant la compétition, l'antibiose et la stimulation de la défense naturelle de la plante. *Bacillus* est un excellent compétiteur en raison de sa capacité à coloniser rapidement la niche écologique.

Les spores de *Bacillus sp* ont un niveau élevé de résistance, elles peuvent coloniser différentes niches écologiques et survivent dans plusieurs milieux différents. Les endospores peuvent survivre à des températures, pH et pressions osmotique extrêmes, de plus, elles résistent à la radiation, aux rayons UV(358), cette capacité de la résistance offre au *Bacillus sp* la meilleure caractéristique d'être un candidat prometteur pour le développement des bio-pesticides efficaces. Les espèces du genre *Bacillus* sont souvent considérées comme des usines microbiennes pour la production d'une vaste gamme de molécules biologiquement actives qui inhibent la croissance des phytopathogènes (Emmert et Handelsman, 1999). Les espèces de *Bacillus* produisent une large variété d'antibiotiques telles que la Bacillomycine, la mycosubtiline et la mycobaciline produites par *Bacillus subtilis* impliquée dans le biocontrôle essentiellement dans la lutte de la pourriture de la racine de tomate causée par *Fusarium oxysporum* (Makoto, 2000) dont 4% à 5% de son génome est orienté vers la synthèse des antibiotiques (Stein, 2005). Ces bactéries productrices d'antibiotiques sont *B. subtilis*, *B. polymyxa*, *B. Brevis*, *B. licheniformis*, *B. circulans*, *B. cereus* (Morikawa et *al.*, 1992).

Bacillus produit aussi des composés volatiles qui sont des antifongiques contre *Rhizctonia solani* et *Pythium ultimum*. La croissance de ces deux champignons a été sévèrement diminuée par la présence de ces composés volatiles (Anandhakummar, 2006). Des enzymes dégradant la paroi cellulaire sont également impliquées (chitinase, cellulase,

etc.) (Farace et al., 2015) et lachitinolytique synthétiser par *Bacillus cereus* qui est utilisée dans le biocontrôle de *Rhizoctonia solani*. L'espèce *Bacillus mycoides* induit la résistance de betterave à sucre par production d'enzymes (peroxydases, chitinases et β 1,3 glucanase). Les Surfactines et lichenysines sont produites par *Bacillus coagulans* (Huszcza et Burczyk, 2006), *Bacillus pumilus* et *Bacillus lichenniformis* (Peypoux et al., 1999).

Tableau 3: Bactéries du genre *Bacillus* ayant démontré des effets prometteurs contre diverses maladies des plantes (He et al., 2019 ; Islam et al., 2017; Santé Canada, 2019a)

| <i>Bacillus</i> sp | Maladie |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>B. amyloliquefaciens</i> | Pourriture post récolte (<i>Aspergillus</i> spp.), tache foliaire (<i>Xanthomonas campestris</i>), mildiou (<i>Bremia lactucae</i>), pourriture racinaire (<i>Pythium</i> spp.) fonte des semis (<i>Rhizoctonia solani</i>) |
| <i>B. mycoides</i> | Pourriture grise (<i>Botrytis cinerea</i>) |
| <i>B. subtilis</i> | Esca de la vigne (<i>Eutypalata</i>), fonte des semis (<i>R. solani</i>), anthracnose (<i>Colletotrichum</i> spp.) brûlure tardive (<i>Phytophthora infestans</i>), fusariose (<i>Fusarium</i> spp) rhizoctonie (<i>Rhizoctonia</i> spp.), chancre de la tige (<i>Phomopsis</i> spp.), tache foliaire (<i>X. campestris</i>), pourriture Brune (<i>Monilinia fructicola</i>), mildiou (<i>Plasmopara viticola</i>), hernie du chou (<i>Plasmodiophora brassicae</i>), tache noire (<i>Diplocar ponrosae</i>), piétin-verse (<i>Tapesia</i> spp.), Cercosporiose noire (<i>Mycosphaerella fijiensis</i>), Blanc |
| <i>B. firmus</i> | Meloidogyne (<i>Meloidogyne</i> spp.) |

| | |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>B. pumilus</i> | Blanc (<i>Erysiphaceae</i>), brûlure tardive (<i>P. infestans</i>), Tâche foliaire (<i>X. campestris</i>), anthracnose (<i>Colletotrichum spp.</i>), fusariose (<i>Fusarium spp.</i>), fonte des |
| | semis (<i>R. solani</i>), cercosporiose noire (<i>M. fijiensis</i>) mildiou (<i>B. lactucae</i>), |
| <i>B. licheniformis</i> | Sclérotiniose (<i>Sclerotinia spp.</i>) |
| <i>B. cereus</i> | Fonte des semis (<i>R. solani</i>) |

III.4. Les avantages et les inconvénients de la lutte biologique

III.4.1. Les avantages

La lutte biologique présente de nombreux avantages du point de vue environnemental, social et économique (Lefort, 2010) :

- Efficace.
- Permet de restreindre ou d'éliminer l'utilisation des pesticides chimiques.
- Moins toxique que les pesticides chimiques.
- Elle est utilisable en serre.
- Permet de diminuer les risques d'apparition de résistances aux produits chimiques.
- Plus grande spécificité d'action.
- Pas de délai de traitement avant la récolte.
- Non contamination des produits (pas de résidus chimiques).
- Faible coût de développement.
- Amélioration de la qualité de vie et de la santé des travailleurs agricole.
- Dégradation rapide des biopesticides, diminuant les risques de pollution.

III.4.2. Les inconvénients

- Lutte souvent faite en prévention et moins efficaces comme curative.
- Activité restreinte lors d'une grande pression du ravageur.
- Effets différé.
- Efficacité pas toujours constante d'une production à l'autre.
- Efficacité relative aux conditions climatiques.

- Activité restreinte lors d'une grande pression du ravageur.
- Conditions d'entreposage des produits biologiques (demi-vie et températures plus fraîche).

Nécessite d'excellentes connaissances de l'écologie des pathogènes cibles et des agents de contrôles biologiques.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La rhizosphère est la partie du sol en contact direct avec les racines de la plante, elle soutient le développement et l'activité d'une communauté microbienne nombreuse et diversifiée.

L'étude du rôle des PGPRs dans la croissance et l'amélioration des espèces végétales constitue à l'heure actuelle un enjeu majeur.

Dans ce travail nous avons porté notre attention sur les PGPRs (les bactéries promotrices de la croissance des plantes) dont ces dernières sont devenues dernièrement un sujet intéressant qui a pour objectif principal d'étudier les microorganismes présents dans la rhizosphère et d'exploiter leurs particularités qui offrent des perspectives biotechnologiques diverses.

D'après l'ensemble des données rassemblées, il s'est avéré que les rhizobactéries représentent une bonne source de lutte biologique, elles sont des bactéries phyto-bénéfiques qui utilisent les exsudats racinaires comme substrats nutritifs pour agir soit directement ou indirectement sur le développement de la plante. Aussi, ces bactéries bénéfiques de la rhizosphère contribuent à la réduction des maladies des plantes en stimulant les défenses naturelles chez l'hôte et en assurant la lutte biologique directe des bio-agresseurs.

La réussite de leur utilisation comme inoculats du sol dépend principalement de la capacité de ces cellules à coloniser efficacement la rhizosphère ainsi que leur pouvoir de synthétiser des métabolites à effet direct ou indirect sur la croissance de la plante.

Le biocontrôle des maladies des plantes, causées par les champignons pathogènes, basé sur l'introduction de microorganismes bénéfiques dans la rhizosphère a été proposé comme une alternative à l'utilisation des substances chimiques de certaines bactéries associées aux plantes particulièrement *Pseudomonas* et *Bacillus* ont été utilisées comme agents de lutte biologique par implication des différents mécanismes d'actions.

Liste bibliographie

Liste bibliographique

1. Adam A. (2008). Elicitations de la croissance systémique induite chez la tomate et le concombre et l'activation de la voie de la lipoxigénase par des rhizobactéries non pathogènes. Thèse de Doctorat. Sciences. Université de Liège. Belgique.
2. Adjanohoun A, Baba- Moussa LS, Dagbénonbakin G, Saïdou A & F Toukourou 2017 des Utilisations des microorganismes du sol pour accroître a productivité agricole : Manuel de l'apprenant. CNS Maïs/INRAB/SNRA. 76 p. , Bibliothèque Nationale (BN) du Bénin, 3ème trimestre, :ISBN : 97899919819-1-8
3. Agrios G.N. (1988). Plant Pathology. Academic Press, San Diego, California. 801.
4. Agrios G.N.(2005). Plant pathology. 5th Edition. Elsevier Academic Press. USA, UK.
5. Agrios, GN (1988) Pathologie végétale. 3e édition, Academic Press, Inc., New York
6. Ahmad, F., I. Ahmad et M.S. Khan (2008). Screening of free living rhizospheric bacteria for their Multiple plant growth promoting activities. Microbial Research, 163 : 173-81.
7. Ajouz S.(2009). Estimation du potentiel de résistance de Botrytis Cinerea à des biofongicides. Thèse de Doctorat. Sciences. Université d'Avignon et des pays de Vaucluse. France.
8. Allmann J., Quadt-Hallmann A., Mahaffee W.F. and Kloepper J.W. 1997. Bacterial endophytes in agricultural crops. Canadian Journal of Microbiology, 43, 895-914.H
9. Anandha kummar, J. 2006. Studies on the antagonistic effect of rhizobacteria against soil Borne Phytophthora species on strawberry. Thèse de doctorat, université de Hannover, Allemagne.
10. Anani B et Bentaleb S. (2016). Production des protéases extracellulaire des moisissures du sol : effets de PH et température. Mémoire du master. Sciences de la nature et de la vie. Université des frères Mentouri. Constantine.
11. Audenaert, K., G.B. De Meyer et M.M. Höfte (2002). Abscisic acid determines basal susceptibility Of tomato to Botrytis cinerea and suppresses salicylic acid dependent signaling mechanisms. Plant Physiol. 128 :491–501.
12. Aydi N. (2013). Maladies de la tomate d'origine fongique. MONASTIR.
13. Bakker, P.A.H.M., C.M.J. Pieterse et L.C. van Loon (2007). Induced Systemic Resistance by Fluorescent Pseudomonas spp. Phytopathology. 97 :239-243 Persello-Cartieaux, L. F., Nussaume et C. Robaglia (2003). Tales from the underground : molecular Plant-rhizobacteria interactions. Plant Cell Environ. 26 :189-199.
14. Baldani, J.I., Baldani, V.L., Goi, S. and Dobereiner, J. 1997. Recent advances in BNF with Non legume plants. Soil Biol. Biochem. 29 :91122

Liste bibliographique

15. Bashan, Y., M.E. Puente, M.N. Rodriguez-Mendoza, G. Toledo, G. Holguin, R. Ferrera-Cerrato Et S. Pedrin (1995). Survival of *Azospirillum brasilense* in the bulksoil and rhizosphere of 23 soil Types. *Appl. Environ. Microbiol.* 61 :1938-1945
16. Beattie, G.A. 2006. Plant-associated bacteria : survey, molecular phylogeny, genomics . In : S.S. Gnanamanickam (ed). *Plant Associated Bacteria*. Springer ,Netherlands, pp : 1–56.
17. Beauchamp C.J. (1993). Mode d'action des rhizobactéries favorisant la croissance des Plantes et potentiel de leur utilisation comme agent de lutte biologique. *Phytoprotection.* 74 (1) :19-27.
18. Benhamou, N., Garand, C., Goulet, A. 2002. Ability of Nonpathogenic *Fusarium*
19. Benmati M. (2004). PGPR, paranodules, stimulation de la croissance et tolérance au Déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) : Aspect moléculaires et Génétiques. Thèse de Doctorat. Biotechnologie et génomique végétale Université de Constantine 1.
20. Benmati M. (2004). PGPR, paranodules, stimulation de la croissance et tolérance au Déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) : Aspect moléculaires et Génétiques. Thèse de Doctorat. Biotechnologie et génomique végétale . Université de Constantine 1.
21. Berggren, I., J. W. L. van Vuurde et A. M. Martensson (2001). Factors influencing the Effect of deleterious *Pseudomonas putida* rhizobacteria on initial infection of pearoots by *Rhizobium Leguminosarum* bv. *Viciae*, *Appl. Soil Ecol.* 17 : 97105.
22. Blancard D., Lot H et Maisonneuve B. (2003). *Maladies des salades : identifier, connaitre, maitriser*. Institut national de la recherche agronomique 147, rue de l'université 75338 Paris cedex 07. France.
23. Botton B., Breton A., Fever M., Guy P.H., Larpeni J et Veau P. (1990). *Moisissures utiles et nuisibles importance industrielles*. 2^{ème} Edition Massan. Paris.
24. Brimmer A. and Boland G.J. (2003). A review of the non-target effects of fungi used To biologically control of plant diseases. *Arg. Ecosyst. Environ.* 100, 3-16.
25. Castegnaro M et Pfohl-Leskowicz A. (2002). *Les mycotoxines : contaminants omniprésents dans l'alimentation animale et humaine, dans la sécurité alimentaire du consommateur*. Lavoisier.
26. Castignetti, D. et J.Jr. Smarrelli (1986). Siderophores, the iron nutrition of plants, and nitrate Reductase . *FEBS Lett.* 209 :147-151.
27. Castric, PA. (1977). Glycine Metabolism by *Pseudomonas aeruginosa* : Hydrogen Cyanide Biosynthesis. *J. Bacteriol.* 130 : 826-831.
28. Champion R. (1997). *Identifier les champignons transmis par les semences*. Editio Erreur Permies INRA. France.

Liste bibliographique

29. Cherif, H (2014). Amélioration de la croissance de blé dur en milieu salin par inoculation avec *Bacillus* sp et *Pantoea* agglomérans isolées de sols arides. Thèse de doctorat : Microbiologie. Département de microbiologie : université Ferhat Abas Sétif 1, 177p.
30. Claude Alabouvette ,Christelle Cordier .Fertilité biologique des sols :des microorganismes utiles à La croissance des plantes. Innovations Agronomiques, INRAE,2018,69,ff10.15454/UIJG8Lff.ffhal02058232ff
31. Corbaz R. (1990). Principe de phytopathologie et de lutte contre les maladies des plantes. Press polytechniques et universitaires.
32. Corbaz R. (1990).Principe de phytopathologie et de lutte contre les maladies desPlantes. Press polytechniques et universitaires.
33. Cox, C.D., Rinehart, K.L., Moore, M.L., Cook, J.C. 1981. Pyochelin : novel structure of an Iron-chelating growth promoter for *Pseudomonas aeruginosa*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 78,pp.4256-4260.
34. Curl, E. A. et B. Truelove (1986). The rhizosphere, pp : 55-92. Springer Verlag, Berlin.
35. De Weger, L.A., Van der Vlugt, C.I.M., Wijfjes, A.H.M., Bakker, P.A.H.M., Schippers, B., Lugtenberg, B. 1987. Flagella of a plant growth stimulating *Pseudomonas fluorescens* Strain are required for colonization of potato roots. J. Bacterio., 169, pp.2769-2773.
36. Deacon J.W. (2006). Fungalbiology. 4^{ème} edition. Institut of cell and Molecular Biology. Université of Edinburgh.
37. DeBach, P. (1964) Biological Control of InsectPests and Weeds. Cambridge UniversityPress, Cambridge, UK, 844 p.
38. DOBBELAERE, S., VANDERLEYDEN, J. et OKON, Y., 2003. Plant growth-promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere. In : CriticalReviews in Plant Sciences. Mars 2003. Vol. 22, n° 2, p. 107149. DOI 10.1080/713610853.
39. Dommergues Y. and Mangenot F. (1970). Écologie Microbienne du sol. Masson, Paris
Curl E. A. and Truelove B. (1986).The rhizosphere, Advanced series in agricultureSciences. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 288.
40. Dong H, AR. Gusti, Q. Zhang, J-L. Xu, L-H. Zhang (2002). Identification of quorum-quenching N Acylhomoserine lactonases from *Bacillus* species. Appl. Environ. Microbiol. 68 : 17541759.
41. Dong H, AR. Gusti, Q. Zhang, J-L. Xu, L-H. Zhang (2002). Identification of quorum-quenching N Acylhomoserine lactonases from *Bacillus* species. Appl. Environ. Microbiol. 68 : 17541759.
42. Doucet R. (2008). Les plantes agricoles et leurs maladies. Edition, Aline Coté. Centre collégial de développement de matériel didactique. Quebec.

Liste bibliographique

43. Emmert E.A.B. and Handelsman J. (1999). Biocontrol of plant disease : a (Gram-) Positive perspective. FEMS. Microbiol. Lett. 171, 1-9.
44. Emmert, E. A. B. and Handelsman, J. 1999. Biocontrol of plant disease : a (Gram-) positive Perspective. FEMS Microbiol. Lett. 171 :19.
45. Errakhi R.(2008).Contribution d'actinomycètes (Actinobactéries) à la lutte biologique Contre Sclerotium rolfsii et rôle de l'acide oxalique dans l'induction des mécanismes de Défense. Thèse de Doctorat. Université Cadi Ayyad, Marrakech Maroc.
46. Ezawa, T, Smith SE et Smith FA. (2002).P metabolism And transport in AM fung. Plant Soil, 244 : 221 230.
47. Farace, G., Fernandez, O., Jacquens, L., Coutte, F., Krier, F., Jacques, P., Clement, C., Barka, E. A., Jacquard, C., and Dorey, S. (2015). Cyclic lipopeptides from *Bacillus subtilis* Activate distinct patterns of defence responses in grapevine. Molecular Plant Pathology 16, 177-87.
48. Glick , B.R., C.B. Jacobson, M.M.K. Schwarze et J.J. Pasternak (1994a).1-Aminocyclopropane 1carboxylic aciddeaminase mutants of the plant growth promoting rhizo bacterium *Pseudomonas putida* GR12-2 do not stimulate canola rootelongation. Can. J. Microbiol. 40 :911–915.
49. GLICK, B.R., 2012. Plant Growth-Promoting Bacteria : Mechanisms and applications. In : Scientifica. Octobre 2012. Vol. 2012, p. 1-15. DOI 10.6064/2012/963401.
50. Glick., B.R., D.M. Penrose et L. Jiping (1998). A model for the lowering plant ethylene Concentrations by plant growth promoting bacteria. J. Theor. Biol.190 :63–68.
51. Gray, E.J., Smith, D.L. 2005. Intracellular and extracellular PGPR : commonalities and Distinctions in the plant bacterium signaling processes. SoilBiol. Biochem. 37 : 395412.
52. Grison P. (1991).Chronique historique de la zoologie agricole française. INRA. Paris .Gugnani H.C. (2003).Ecology and taxonomy of pathogenic *Aspergillus*. Institut Saint James school of Medicine Department Microbiology and Epidemiology.
53. Gupta, S.S. (2003).Chemotactic response of plant-growth-promoting bacteria towards roots of Vesicular-arbuscularmycorrhizal tomato plants. FEMS Microbiol. Ecol. 45(3) :219-227.
54. Haas, D., et G. Défago (2005).Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent *Pseudomonads*. Natra. Rev. Microb.1129.
55. Haas, D., Keel, C., Laville, J., et al., 1991. Secondary metabolites of *Pseudomonas* Verma, D.P.S. Advances in moleculargenetics of plant-microbe interactions. Ed. Dordrecht,Fluorescensstrain CHA0 involved in the suppression of rootdiseases. In : Hennecke, H.,Kluwer Academic Publishers, pp.450-456.

Liste bibliographique

56. Hardoim, P.R., Overbeek, L. S. V. and Elsas, J. D. V. 2008. Properties of bacterial Endophytes and their proposed role in plant growth. *Trends in Microbiology* 16(10) : 463- 471.
57. Helluy S ;Holmes J.C. 2005. Parasitic manipulation :further consideration. *Behav .process.* 68 , 205-210
58. Henis, Y., Bashan, Y. 1986. Epiphytic survival of bacterial leaf pathogens. In N. J. Fokkema & J. van den Heuvel (eds), *Microbiology of the phyllosphere* (pp. 252-268), New York :Cambridge Univ. Press.
59. Hinsinger, L., Jaillard, B. and Arvieu, J.C. 1996. Le sol, un patrimoine menacé. Le point Scientifique. INRA, Département de Science du Sol, Paris.
60. Hoffmann, G.M., Nienhaus, F., Schönbeck, F., Weltzien, H.C., Wilbert, H., 1994. *Lehrbuch der Phytomedizin*. Blackwell Wissenschafts Verlag, Berlin.
61. Howell, C. R., R. C. Beier et R. D. Stipanovic (1988). Production of ammonia by *Enterobacter Cloacae* and its possible role in the biological control of *Pythium* pre-emergence damping-off by the bacterium. *Phytopathologia*, 78 :1075-1078.
62. Howell, C.R., Stipanovic, R.D. 1979. Control of *Rhizoctonia solani* on cotton seedlings with *Pseudomonas fluorescens* and with an antibiotic produced by the bacterium. *Phytopathology*, 69, p
63. IARC L. (1993). Some naturally and occurring substances, food items and constituent of carcinogenic risks to human. World Health Organization, Lyon. France.
64. Jacobson, C. B., J. J. Pasternak, et B.R. Glick (1994). Partial purification and characterization of ACC deaminase from the plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* GR122. *Can. J. Microbiol.*, 40 : 1019-1025.
65. Jijakly M.H. (2003). La lutte biologique en phytopathologie, In : *Phytopathology*.
66. Jofre, E., A. Lagares et G. Mori (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.
67. Jonathan Gerbor. lutte biologique contre un champignon pathogène impliqué dans l'esca de la vigne, par l'utilisation de l'oomycète *Pythium oligandrum*. thèse de doctorat, Université du Pau et des pays de l'Adour. faculté des sciences agronomiques, biotechnologie agroalimentaire, 259p
68. Jourdeuil, P. Grison et A. Fraval. La lutte biologique : Un aperçu historique. *Courrier de la Cellule Environnement de l'INRA n° 15*. Département de Zoologie de l'INRA. La Minière 78280 Guyancourt.
69. Jourdeuil, P. Grison, P. Faraval, A. (1991). La lutte biologique, un aperçu historique. In Institut National de la recherche agronomique (INRA). *Le courrier de l'environnement de l'INRA*.

Liste bibliographique

70. Keel, C., Schnider, U., Maurhofer, M., Voisard, C., Laville, J., Burger, U., Wirthner, P., Haas, D., Defago, G. 1992. Suppression of rootdiseases by *Pseudomonas fluorescens* CHA0 Importance of the bacterial secondary metabolite 2,4-diacetyl-phloroglucinol. *Molecular Plant Microbe Interactions*, 5, pp.413.
71. Keel, C., Weller, D.M., Natsch, A., Defago, G., Cook, R.J., Tomashaw, L.S. 1996. Conservation of the 2,4-diacetyl-phloroglucinol biosynthesis locus among fluorescent *Pseudomonas* strains from diverse geographic locations. *Applied and Environmental Microbiology*, 62, pp.552563.
72. Kempe J. and Sequeira L. (1983). Biological control of bacterial wilt of potatoes : Attempts to induce resistance by treating tubers with bacteria. *Plant Dis.* 67, 499-501
73. Kirdi B. (2011). Rôle des PGPR «Plant Growth Promoting Rhizobacteria» dans la Croissance végétale et la lutte contre les phanérogames parasites. Magister. Sciences Agronomiques. Ecole National Supérieur Agronomique. El Harrach-Alger.
74. Kirdi B. (2011). Rôle des PGPR «Plant Growth Promoting Rhizobacteria» dans la Croissance végétale et la lutte contre les phanérogames parasites. Magister. Sciences Agronomiques. Ecole National Supérieur Agronomique. El Harrach-Alger.
75. KLOPPER, J.W., LEONG, J., TEINTZE, M., SCHROTH, M.N., 1980. Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. In : *Nature*. Vol. 286, n°1, p. 885886. DOI 10.1038/286885a0.
76. KLOPPER, J.W., LEONG, J., TEINTZE, M., SCHROTH, M.N., 1980. Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. In : *Nature*. Vol. 286, n°1, p. 885886. DOI 10.1038/286885a0.
77. Kouassi M. (2001). La lutte biologique : une alternative viable à l'utilisation des pesticides ?. *Vertigo*. 2 (2) : 4000-4101.
78. Lam, S.T., Gaffney, T.D., Ligon, J., et al., 1992. Mutants of a *Pseudomonas fluorescens* Comai, L., Gordon, M., Leigh, J. Ed. Book of abstracts of the sixth international symposium Biological control strain with altered production of anti-fungal activities. In : Nester, E., On molecular plant microbes interactions. Seattle, University of Washington, 231p
79. Lambert L. (2010). Lutte biologique aux ravageurs : Application au Québec. Centre Universitaire de formation en environnement. Université de Sherbrooke. Québec. Canada.
80. Leben, C. 1965. Epiphytic microorganisms in relation to plant disease. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 3, 209230.
81. Lefort F. (2010). Lutte biologique et lutte microbiologique : des concepts anciens pour Des méthodes de lutte modernes. Haute Ecole de Paysage d'ingénierie et D'architecture. Genève.
82. Leisinger, T., Margraff, R. 1979. Secondary metabolites of the fluorescent pseudomonads. *Microbiol. Rev.*, 43, pp.422-442.

Liste bibliographique

- 83.** Lepoivre P. (2003). Les bactéries phytopathogènes. La phytopathology. Edition De Boeck. Bruxelles.
- 84.** Lepoivre P. (2003). Les bactéries phytopathogènes, In : Phytopathology. Lepoivre P.(Eds). De Boeck, Bruxelles.
Lepoivre P.(Eds). De Boeck, Bruxelles.
- 85.** Ligon, J.M., Hill, D.S., Hammer, P.E., Torkewitz, N.R., Hofmann, D., Kempf, H.J., VanPee, K.H. 2000. Natural products with antifungal activity from *Pseudomonas* biocontrol Bacteria. *Pest Management Science*, 56, pp.688-695.
- 86.** Lim, H.S., Kim, Y.S., Kim, S.D. 1991. *Pseudomonas stutzeri* YPL-1 genetic transformation And antifungal mechanism against *Fusarium solani*, an agent of plant root rot. *Appl. Environ. Microbiol.*, 57, pp.510516.
- 87.** Makoto, S. 2000. Bacterial control of plant diseases. *Journal of bioscience and Bioengineering*, 89(6) :515-521
- 88.** Martinez-V O., Jorquera M.A., Crowley D.E., Gajardo G et Mora M.L. (2010). Mechanisms and piratical consideration involved in plant growth promotion by Rhizobacteria. *Jornal of Soil Science and Plant Nutrition*. 10 (3) : 293-319.
- 89.** Martínez-Viveros¹ , MA Jorquera² , DE Crowley³ *, G. Gajardo⁴ et ML Mora., 2010 MÉCANISMES ET CONSIDÉRATIONS PRATIQUES IMPLIQUÉS DANS LA PROMOTION DE LA CROISSANCE DES PLANTES PAR LES RHIZOBACTÉRIES .*Journal de la science du sol et de la nutrition des plantes* 10 (3): 293 – 319
- 90.** Maurhofer, M., Keel, C., Haas, D., Defago, G. 1994. Pyoluteorin production by *Pseudomonas fluorescens* strain CHA0 is involved in the suppression of *Pythium* damping-off of cress but not of cucumber. *European Journal of Plant Pathology*, 100, pp.221-232.
- 91.** Mazoyer M.(2002). Dictionnaire Larousse agricole. Edition ISBN. Canada.
- 92.** McLoughlin, T.J., Quinn, J.P., Bettermann, A., Bookland, R. 1992. *Pseudomonas cepacia* Suppression of sunflower wilt fungus and role of antifungal compounds in controlling the Disease. *Appl. Environ. Microbiol.*, 58, pp.1760-1763.
- 93.** Meziane, H., I. van der Sluis, LC. Van Loon, M. Höfte et PAHM. Bakker (2005). Determinants of *Pseudomonas putida* WCS358 involved in inducing systemic resistance in plants. *Mol. Plant Pathol.* 6 :177-185.
- 94.** Morikawa, M., Ito, M., Imanaka, T. 1992. Isolation of a new surfactin producer *Bacillus pumilus* A1, and cloning and nucleotide sequence of the regulator gene, *psf1*. *Journal of Fermentation and bioengineering*, 74(5), pp. 255-261.
- 95.** Nasraoui B. (2008). Principales maladies fongiques des céréales et des légumineuses en Tunisie. Main Fungal diseases of cereals in Tunisia. Centre de publication universitaire. Tunisie.

Liste bibliographique

- 96.** Neilands, JB. Et SA. Leong (1986). Siderophores in relation to plant growth and disease. *Ann. Rev. Pl. Physiol.*, 37 : 187-208.
- 97.** Neilands, JB., K. Konopka, B. Schwyn, M. Coy, , RT. Francis, BH. Paw (1987). Comparative Biochemistry of microbial iron assimilation. In : *Iron Transport in Microbes, Plants and Animals*.
- 98.** O'Sullivan, D. J., & O'Gara, F. (1991). Regulation of iron assimilation : nucleotide sequence Analysis of an iron-regulated promoter from a fluorescent pseudomonad. *Mol. Gen. Genet.* 228 : 1-8.
- 99.** Ongena, M., A. Giger, P. Jacques, J. Dommes et P. Thonart (2002). Study of bacterial Determinants involved in the induction of systemic resistance in bean by *Pseudomonas putida* BTP1. *Euro. J. Plant Pathol.*, 108 : 187-196.
- Oxysporum Strain Fo47 to Induce Resistance against *Pythium ultimum* Infection in Cucumber. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(8), p. 4044-4060
- 100.** Paul R. and Impens P. (2003). Les maladies non parasitaires. In : *Phytopathology*. Lepoivre P. (Eds). De Boeck, Bruxelles.
- 101.** Peypoux, F., J. M. Bonmatin et J. Wallach (1999). Recent trends in the biochemistry of surfactin. *Appl. Environ Microbiol.* 51 : 553-563.
- 102.** Piano, S., V. Neyrotti, Q. Migheli et M.L Gullino (1997). Biocontrol capability of *Metschnikowia pulcherrima* against *Botrytis* postharvest rot of apple. *Postharvest Biol. Technol.* 11(3) : 131-140.
- 103.** Ping, L. et W. Boland (2004). Signals from the underground : bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis*. *Trends Plant Sci.* 9 : 263-266.
- 104.** Pitt J.I. (2000). Toxigenic fungi and mycotoxins. *British Medical Bulletin.* 56(1) : 184-192.
- 105.** Ramos A.J., Labernia N., Marin S., Sanchez v et Magan N. (1998). Effect of water activity and temperature and growth and ochratoxin production by three strains of *Aspergillus ochraceus* on a barley extract medium and on barley grains. *International Journal of Food Microbiology.* 44 : 133-140.
- 106.** Rocher F. (2004). Lutte chimique contre les champignons pathogènes des plantes : Evaluation du système phloémienne de nouvelles molécules à l'effet fongicide et d'activateurs de réactions de défense. Thèse de Doctorat. Sciences fondamentales et appliquées. Université de Poitiers.
- 107.** Rosales, A.M., Thomashow, L., Cook, R.J., Mew, T.W. 1995. Isolation and identification of antifungal metabolites produced by rice-associated antagonistic *Pseudomonas* spp. *Phytopathology*, 85, pp. 1028-1032.
- 108.** Rouvière M. (2002). Ochratoxine A : Nature, origine et toxicité. Thèse de Doctorat. Sciences vétérinaires. Université Paul Sabatier. Toulouse.

Liste bibliographique

- 109.** Ryu, CM., MA. Farag, CH. Hu, MS. Reddy, HX. Wei, PW. Paré et JW. Kloepper (2003). Bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 100 : 4927-4932
- 110.** Sarniguet, A. 1990. Réceptivité des sols au piétin échaudage du blé : influence des rotations et de la fertilisation azotée en relation avec certains facteurs physicochimiques et les peuplements de *Pseudomonas fluorescens*. Thèse. Université Paris-Sud, Orsay, 98p.
- 111.** Scher, F.M., Kloepper, J.W., Singleton, C., Zaleska, I., Laliberte, M. 1988. Colonization of soybean roots by *Pseudomonas* and *Serratia* species : relationship to bacterial motility, Chemotaxis, and generation time. *Phytopathology*, 78, pp.1055-1059.
- 112.** Schippers, B., AW. Bakker et PAHM. Bakker (1987). Interactions of deleterious and beneficial rhizospheric microorganisms and the effect of cropping practices. *Ann. Rev. Phytopathol.* 25 : 339-358.
- 113.** Semal J. and Lepoivre P. (2003). Les maladies des plantes : concepts généraux. In : *Phytopathology*. Lepoivre P. (Eds). De Boeck, Bruxelles.
- 114.** Soufiane B. (1998). Isolement à partir de la rhizosphère des conifères de bactéries et d'actinomycètes antagonistes aux champignons phytopathogènes. Mémoire de maîtrise. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Université Laval, Québec.
- 115.** Stein, T. 2005. *Bacillus subtilis* antibiotics : structures, syntheses and specific functions. *Molecular Microbiology*, 56(4) : 845-857.
- 116.** Stephens, KM., C. Roush, et EW. Nester (1995). *Agrobacterium tumefaciens* VirB11 protein requires a consensus nucleotide binding site for function in virulence. *J. Bacteriol.* 177 : 2736.
- 117.** Suty L, (2010). La lutte biologique : vers de nouveaux équilibres écologiques. Edition : Quae, Technology and Engineering. 323p.
- 118.** Sylvain D. (1996). Dégradation de la caféine par *Aspergillus* sp et *Penicillium* sp. Etude physiologique et biochimique. Thèse de Doctorat. Biochimie et Biologie Moléculaire. Université Montpellier II.
- 119.** Tabuc C. (2007). Flore fongique de différents substrats et conditions optimales de production des mycotoxines. Thèse de Doctorat. Pathologie, mycologie, génétique et nutrition. Institut national polytechnique de Toulouse et de l'université de Bucarest.
- 120.** Tomashow, L.S. 1996. Biological control of plant pathogens. *Curr. Opin. Biotech.*, 7, pp.343-347.
- 121.** Toussaint V. (1996). Caractérisation d'un antibiotique produit par la souche d'actinomycète EF-76 antagoniste à *Phytophthora Fragariae* var. *Rubicausa* le Pourridié des racines du framboisier. Mémoire de Maîtrise ès sciences. Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

Liste bibliographie

- 122.** Van Driesche RG, Bellows TS (1996) Biological control. Chapman & Hall, New York DOI :10.1007/978-1-4613-1157-7
- 123.** Van Loon, LC. Et PA. Bakker (2005). Induced systemic resistance as a mechanism of disease suppression by rhizobacteria. In : Siddiqui Z.A., ed. PGPR : Biocontrol and biofertilization. Dordrecht, The Netherlands : Springer, 3966.
- 124.** Van Peer, R., Niemann, G.J., Schippers, B. 1991b. Induced resistance and phytoalexin accumulation in biological control of Fusarium wilt of carnation by *Pseudomonas* sp. Strain WCS417r. *Phytopathology*, 81, pp.728-734.
- 125.** Vesper, S.J. 1987. Production of pili (fimbriae) by *Pseudomonas fluorescens* and correlation with attachment to corn roots. *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, pp.422-442.
- 126.** Vessy (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil*. 255 :571-586.
- 127.** Voisard, C., Keel, C., Haas, D., Défago, G. 1989. Cyanide production by *Pseudomonas fluorescens* helps suppress black root rot of tobacco under gnotobiotic conditions. *EMBO J.*, 8, pp.351-358
- 128.** Voisard, C., Keel, C., Haas, D., Défago, G. 1989. Cyanide production by *Pseudomonas fluorescens* helps suppress black root rot of tobacco under gnotobiotic conditions. *EMBO J.*, 8, pp.351-358.
- 129.** Weeden, C.R., Shelton, A.M. et Hoffman, M.P. (2007). *Biological control : A Guide to Natural Enemies in North America*.
- 130.** Whipps J.M., 2001. Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. *J. Exp. Bot.*, 52 :487-511

Effet des bacteries du sol sur certains champignons pathogenes des plantes

Résumé

Le contrôle biologique par l'utilisation des rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR) peut être un outil prometteur pour l'amélioration de la production végétale et la gestion intégrée des parasites des cultures.

Récemment, l'application des PGPRs pour la biorestauration des sols et l'amélioration de la croissance et de la santé des végétaux a reçu une attention considérable pour ses avantages rentables. Des bactéries appartenant aux genres *Bacillus* et *Pseudomonas* ont prouvé leur efficacité en tant qu'agent du biocontrôle, protégeant différentes cultures contre les champignons phytopathogènes notamment *Botrytis*, *Aspergillus*...etc.

L'importance de ce travail vient du fait que les PGPRs constituent une meilleure alternative aux produits chimiques nocifs utilisés en agriculture.

Mots-clés : Rhizosphère, bactéries, champignons, ravageurs, phytopathogènes, PGPR.

Abstract

Biological control through the use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) is a promising tool for crop pest management. Recently, the application of PGPR for soil bioremediation and improved plant growth and health has received considerable attention for these cost-effective benefits.

Bacteria belonging to the genus *Bacillus* and *Pseudomonas* have proven their effectiveness as a biocontrol agent, protecting different crops against phytopathogenic fungi including *Botrytis*, *Aspergillus* ...etc.

The importance of this work comes from the fact that PGPR are a better alternative to harmful chemicals used in agriculture.

Cy word : Rhizosphere, Bacteria, fungi, pests, plant pathogen, PGPR.

المخلص

المكافحة البيولوجية من خلال استخدام البكتيريا الجذرية التي تعزز نمو النباتات يمكن أن تكون أداة واعدة لتحسين إنتاج المحاصيل والإدارة المتكاملة لآفات المحاصيل. في الآونة الأخيرة حظي تطبيق هذه البكتيريا للمعالجة الحيوية للتربة وتحسين نمو النبات وصحته باهتمام كبير لهذه الموارد الفعال من حيث التكلفة.

أثبتت بعض البكتيريا فعاليتها كعامل تحكم بيولوجي، كحماية المحاصيل المختلفة من الفطريات الممرضة للنبات، وتأتي أهمية هذا العمل من حقيقة أن البكتيريا الجذرية التي تعزز نمو النباتات هي بديل أفضل للمواد الكيميائية الضارة المستخدمة في الزراعة.

الكلمات المفتاحية: جذور، البكتيريا، الفطر، ممرضة للنبات، الآفات.