

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
المدرسة الوطنية العليا للعلوم الفلاحية  
Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie  
El-Harrach, Alger

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en  
Protection des Végétaux

**Option : Phytopathologie Biologique et Génétique de l'interaction plante hôte  
pathogène en protection des cultures**

## Sujet

**Effets de l'inoculation avec des bactéries rhizosphériques sur la  
croissance du blé et le développement de quelques bio-agresseurs  
qui lui sont associés.**

**Par : MESSAOUDI Hanane**

Soutenu à l'ENSA, le : 17/12/2014 devant le jury composé de :

**Président :** M<sup>me</sup> Khelifi-Slaoui M. Professeur ENSA, El-Harrach.

**Directeur de Thèse :** M<sup>lle</sup> Zermane N. Professeur ENSA, El-Harrach.

**Examineurs:** — M<sup>me</sup> Abrous O. Professeur USTHB.

M<sup>r</sup>. Mefti M. Maître de conférences ENSA, El-Harrach.

2014-2015

*Remerciements*

*Ces quelques lignes vont me permettre de remercier les responsables et personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail soit au niveau scientifique mais aussi personnel, et sans qui, mon travail n'aurait pu aboutir.*

*J'adresse ma gratitude et je remercie M<sup>elle</sup> ZERMANE Nadja Professeur qui a dirigée ce travail, ça ne sera pas suffisant pour lui exprimer toute ma grande reconnaissance pour la confiance, la disponibilité, la générosité et le grand soutien qu'elle m'a accordée pour faire aboutir ce travail.*

*Je suis très honorée par la présence de Madame KHELIFI-SLAOUI Medjda pour avoir accepté de présider le jury de la soutenance de ma thèse, qu'elle trouve ici mes vifs remerciements.*

*Mes remerciements sont aussi adressés aux membres de jury Madame ABROUS O. et Monsieur Mefti M., qui m'ont fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail et qu'ils acceptent ici mes sentiments de gratitude*

*J'adresse un remerciement particulier à M<sup>r</sup> Alleg Y, pour son aide, ses précieux conseils avisés. C'est avec plaisir que je lui témoigne toute ma reconnaissance sans oublier la gentillesse, la sympathie et les encouragements de Houria, Fatima et Samia.*

*Je remercie aussi mes collègues de la Direction des Services Agricoles de la Wilaya de BOUIRA*

*Finalement, j'exprime mes remerciements à tous mes, ami(e)s.*

## *Dédicace*

*Cette thèse représente l'aboutissement du soutien et des encouragements que ma mère m'a prodiguée tout au long de ma scolarité.*

*La patience et l'encouragement de mon frère Sofiane, mes sœurs Amel et Narimane, qui m'ont aidé à surmonter toutes les difficultés rencontrées au cours de cette thèse sans oublier les petits de ma famille Lyza, Lilia, Aymen, Akram, Chaïma, Abdou et Liiiiiiina.*

## *Liste des illustrations*

<b>Figure 1.</b> Evolution de la production nationale de blé en Algérie.....	4
<b>Figure 2.</b> Représentation schématique des mécanismes d'action directe et indirecte des PGPR.....	11
<b>Figure 3.</b> Contribution des microorganismes à la nutrition des plantes en P.....	13
<b>Figure 4.</b> Le système immunitaire des plantes en interaction avec des microbes.....	17
<b>Figure 5.</b> Exemples de sidérophores classés selon leurs groupements fonctionnels catecholates, hydroxamates et types mixés.....	18
<b>Figure 6.</b> Les principaux antibiotiques produits par les souches de biocontrôle .....	20
<b>Figure 7.</b> La résistance systémique induite chez les plantes par des rhizobactéries.....	23
<b>Figure 8.</b> Les différents sites de prélèvement des échantillons de blé dur .....	33
<b>Figure 9.</b> Le matériel végétal utilisé. ....	34
<b>Figure 10.</b> Etapes d'isolement des bactéries rhizosphériques.....	35
<b>Figure 11.</b> Etapes de l'essai en pots.....	39
<b>Figure 12.</b> Aspect des champignons et bactéries phytopathogènes en cultures utilisés dans les tests d'antagonisme.....	42
<b>Figure 13.</b> Dispositif d'évaluation de l'effet des souches rhizobactériennes sur la croissance mycélienne de quelques champignons phytopathogènes .....	43
<b>Figure 14.</b> Test d'évaluation de l'activité antibactérienne .....	45
<b>Figure 15.</b> Effet des souches rhizobactériennes sur la germination des graines de la variété Chen's de blé dur.....	47
<b>Figure 16.</b> Effet des 22 souches rhizobactériennes sur la longueur du coléoptile de la variété Chen's de blé dur.....	48
<b>Figure 17.</b> Effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la longueur du coléoptile de cinq variétés de blé dur.....	50
<b>Figure 18.</b> Effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la longueur du coléoptile de cinq variétés de blé dur.....	51
<b>Figure 19.</b> Evolution dans le temps du taux d'émergence des plantules de blé variété Massinissa sous l'effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées appliquées sous forme de suspension bactérienne	

ou d'enrobage des semences.....	52
<b>Figure 20.</b> Croissance de la plante après trois semaines de culture sous l'effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées appliquées sous forme de suspension bactérienne ou de semences enrobées.....	53
<b>Figure 21.</b> Évolution du taux d'expansion de la feuille de rang 3 des plantules de blé variété Massinissa, après trois semaines de culture sous l'effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées appliquées sous forme de suspensions bactériennes ou de semences enrobées. ....	54
<b>Figure 22.</b> Croissance de plantules de blé variété Massinissa après quatre semaines de culture en pots sous l'effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées appliquées sous forme de suspensions bactériennes ou de semences enrobées. Évolution du taux d'expansion de la feuille de rang 4.....	56
<b>Figure 23.</b> Croissance des plantules de blé variété Massinissa après cinq semaines de culture en pots sous l'effet des trois souches rhizobactériennes, appliquées sous forme de suspension bactérienne ou de semences enrobées. Évolution du taux d'expansion de la feuille de rang 5.....	57
<b>Figure 24.</b> Effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées appliquées sous forme de suspension bactérienne ou de semences enrobées sur l'expansion des feuilles de rangs 6, 7, 8 et 9 des plantules de blé variété Massinissa.....	59
<b>Figure 25.</b> Test en pots de l'évaluation de l'effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées appliquées sous forme de suspension bactérienne ou de semences enrobées sur la croissance de blé variété Massinissa .....	60
<b>Figure 26.</b> Effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes sélectionnées à l'égard de dix champignons phytopathogènes.....	66
<b>Figure 27.</b> Effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes sélectionnées à l'égard de cinq bactéries phytopathogènes .....	67
<b>Figure 28.</b> Distribution des hormones végétales durant tout le cycle de développement de la plante, exemple d'une céréale.....	72
<b>Figure 29.</b> Représentation schématique de l'effet de l'absence (gauche) ou de la présence (droite) de PGPR producteurs d'ACC désaminase quand la plante subit un stress (biotique ou abiotique). La taille des flèches indique le degré relatif du flux.....	73

### *Liste des tableaux*

<b>Tableau 1 :</b> Les principaux ravageurs, adventices et maladies du blé en Algérie .....	6
<b>Tableau 2 :</b> Les différentes variétés de blé utilisées.....	32
<b>Tableau 3.</b> Les différentes souches bactériennes isolées.....	36
<b>Tableau 4.</b> Origine des microorganismes utilisés dans les tests d'antagonisme.....	41
<b>Tableau 5.</b> Poids sec des racines des plantules de blé variété Massinissasuite à l'inoculation par les trois souches rhizobactériennesélectionnées.....	61
<b>Tableau 6.</b> Poids sec des feuilles des plantules de blé dur variété Massinissa suite à l'inoculation par les trois souches rhizobactériennesélectionnées.....	62
<b>Tableau 7.</b> Poids sec des plantules entières de blé variété Massinissa suite à l'inoculation par les trois souches rhizobactériennes sélectionnées.....	63
<b>Tableau 8.</b> Diamètre moyen de la croissance mycélienne des champignons phytopathogènes testés sous l'effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées.....	63
<b>Tableau 9.</b> Pourcentage de réduction de la croissance mycélienne des isolats fongiques lors de la confrontation directe sous l'effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées.....	64
<b>Tableau 10 :</b> Effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes sélectionnées à l'égard de cinq bactéries phytopathogènes.....	66

## ***Liste des abréviations***

**ABA** : Acide abscissique;  
**ACC désaminase** : La 1-Amino-cyclopropane-1-carboxylate;  
**AHL**: N-acyl-homoserine lactone;  
**AIA** : Acide Indole Acétique;  
**ALB**: Agent de Lutte Biologique;  
    **AS**: Acide Salicylique ;  
**B.subtilis**: *Bacillus subtilis*;  
    **bv**: biovar;  
    **CHAO**: *P. fluorescens* CHAO;  
**DAPG** :2,4-diacetylphloroglucinol;  
**ddl** : Degré de liberté;  
**E.P.S**: Exo-Polysaccharide;  
**ETI**: Effector-Triggered Immunity;  
**FAO**:Food and Agriculture Organization;  
    **G** : Génération;  
    **HS** : Hautement Significatif;  
**ISR**:Induced Systemic Resistance;  
**KB**: milieu B de King;  
**MAMP**: Microbe-Associated Molecular Pattern;  
    **MTI**: MAMP-Triggered Immunity;  
**NS**: Non Significatif;  
    **Ø** : Diamètre;  
    **PCA** : Phénazine-L-Carboxylate;  
    **PCN**:Phénazine-L-Carboxamide;  
    **PGPR**: Plant Growth Promoting Rhizobacteria;  
    **PLT**: Pyolutéorine;  
    **PRN**: Pyrrolnitrine;  
    **PVDs**: Pyoverdines;  
    **QS**: Quorum Sensing;  
    **RAS** : Root-Adhering Soil  
    **RFCP**: Rhizobactéries Favorisant la Croissance des Plantes;  
    **SAR**: Systemic Acquired Resistance;  
    **THS**: Très Hautement Significatif.

## *Sommaire*

Liste des illustrations.....	I
Liste des tableaux .....	III
Liste des abréviations.....	IV
Table des matières.....	V
Introduction Générale .....	1

### *Synthèse bibliographique*

I. Données sur la céréaliculture .....	4
1. Importance et situation de la céréaliculture dans le monde et en Algérie.....	4
2. Facteurs limitant la production des céréales en Algérie.....	5
a) Maladies causant des symptômes localisés sur le feuillage.....	5
b) Maladies causant des pourritures racinaires .....	6
c) Maladies causant des symptômes sur les épis et sur les graines.....	6
d) Autres ravageurs.....	6
3. Dégâts et nuisibilité.....	7
4. Moyens de lutte.....	7
II. La rhizosphère.....	8
1. Définition.....	8
2. La communauté microbienne de la rhizosphère.....	8
3. Les bactéries bénéfiques .....	10
3.1. Les bactéries rhizosphériques en tant qu'organismes stimulateurs de la croissance des plantes.....	10
3.1.1.Synthèse de phyto-hormones.....	11
3.1.1.1. Thidiazuron (cytokinines).....	11
3.1.1.2. Acide Indole-3-acétique (AIA).....	12



3.1.1.3.Éthylène (ETH : H <sub>2</sub> C=CH <sub>2</sub> ) et 1-Amino-cyclopropane-1-carboxylate (ACC) désaminase.....	12
3.1.2. Solubilisation des phosphates.....	13
3.1.3. Production d'EPS.....	14
3.1.4. Fixation de l'azote moléculaire.....	15
3.2. Les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes(PGPR) entant qu'agents de lutte biologique.....	16
3.2.1. Reconnaissance des bactéries PGPR par la plante hôte.....	16
3.2.2. Modes d'action des PGPR en lutte biologique.....	17
3.2.2.1. Interactions directes PGPR/Pathogène.....	17
3.2.2.1.1. Compétition trophique et spatiale .....	17
a) Compétition trophique (les sidérophores).....	17
b) Compétition spatiale.....	19
3.2.2.1.2. Antibiose .....	19
a) Métabolites Secondaires possédant des propriétés de bio contrôle (les antibiotiques)....	20
b) Facteurs influant la production d'antibiotiques et leurs efficacités.....	21
3.2.2.1.3. Parasitisme .....	21
3.2.2.1.4. Atténuation de la virulence des pathogènes.....	22
3.2.2.2. Interactions indirectes PGPR/Plante .....	22
3.2.2.2.1.1. La résistance systémique induite ou ISR (Induced SystemicResistance).....	22
3.2.2.2.1.1 Les éliciteurs de l'ISR.....	23
a) Les flagelles bactériens.....	24
b) Les lipopolysaccharides (LPS).....	24
c) Métabolites sécrétés.....	24
3.2.2.2.1.2. Voies de signalisation hormonale de la résistance.....	25
a) Voie dépendante de l'acide salicylique.....	25
b) Voie indépendante de l'acide salicylique.....	25

3.2.3. Régulation du métabolisme secondaire.....	26
3.2.3.1. Deux composants du système de régulation .....	26
a) Le système GacS/GacA.....	26
b) Les protéines LuxI et LuxR de régulation.....	26
3.2.3.2 Facteur Sigma.....	27
3.2.3. Quorum Sensing(QS).....	27
4. Utilisation des PGPR en agriculture.....	28
5. La survie des bactéries après inoculation.....	28
6. Formulations des produits bactériologiques à base de PGPR.....	29
7. Principaux travaux réalisés sur les PGPR en grandes cultures.....	30

### ***Matériel et méthodes***

1. Prélèvement des échantillons .....	32
2. Isolement des rhizobactéries.....	34
2.1. Méthode d'isolement .....	34
2.2. Sélection des colonies bactériennes .....	35
3. Evaluation des souches rhizobactériennes pour leur activité stimulatrice de la croissance végétale.....	37
3.1. Préparation de l'inoculum.....	37
3.2. Désinfection des graines de blé dur.....	37
3.3. Evaluation <i>in-vitro</i> de l'effet de 22 souches rhizobactériennes sur la germination de la variété Chen's de blé dur.....	37
3.4. Evaluation <i>in vitro</i> de trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la germination et la longueur du coléoptile de cinq variétés de blé dur.....	37
3.5. Evaluation de l'activité stimulatrice de la croissance des trois souches rhizobactériennes en pots.....	38
3.5.1 Traitement des graines et semis.....	38
3.5.2 Arrosage et rappel bactérien.....	39
3.5.3 Suivi de l'essai.....	40

4. Evaluation de l'activité antagoniste <i>in-vitro</i> des trois souches sélectionnées à l'égard de quelques champignons et bactéries phytopathogènes .....	40
4.1. Activité antifongique.....	43
4.2 Activité antibactérienne.....	44
5. Analyse statistique.....	45

### ***Résultats et Discussion***

1. Isolement et purification des rhizobactéries.....	46
2. Sélection des souches stimulatrices de la croissance végétale.....	46
2.1.Effet de 22 souches rhizobactériennes sur la germination de la variété de blé dur « Chen's ».....	46
2.1.1. Effet sur le taux de germination des graines de blé.....	46
2.1.2. Effet sur la longueur du coléoptile.....	47
2.2. Effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la germination de cinq variétés de blé dur.....	49
2.2.1. Effet sur le taux de germination des cinq variétés de blé.....	49
2.2.2. Effet sur la longueur du coléoptile.....	50
3. Effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la croissance de blé dur variété Massinissa cultivée en pots.....	51
3.1. Effet sur l'émergence des plantules de blé.....	51
3.2. Effet sur les différents stades de développement des plantules de blé.....	53
3.2.1. Stade trois feuilles.....	53
3.2.2. Stade quatre feuilles.....	55
3.2.3 Stade cinq feuilles.....	56
3.2.4 Stades 6, 7, 8 et 9 feuilles.....	58
4. Effet sur le poids de la matière sèche des différentes parties de la plante.....	61
4.1. Effet sur le poids sec des racines des plantules de blé variété Massinissa.....	62
4.2 Effet sur le poids sec des feuilles des plantules de blé variété Massinissa.....	62
4.3 Effet sur le poids sec des plantules entières de blé variété Massinissa.....	62
5. Effet antagoniste des souches rhizobactériennes sélectionnées à l'égard de dix isolats de champignons phytopathogènes.....	63
6. Effet antagoniste des souches rhizobactériennes sélectionnées à l'égard de cinq souches	

de bactéries phytopathogènes.....	66
7. Discussion.....	68
7.1 Isolement et purification des rhizobactéries.....	68
7.2 Sélection des souches stimulatrices de la croissance végétale.....	68
7.2.1 Effet de 22 souches rhizobactériennes sur la germination de la variété Chen's de blé dur.....	68
7.2.2 Effet des trois souches rhizobactériennes sur la germination de cinq variétés de blé dur.....	69
7.3 Effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la croissance de blé variété Massinissa cultivée en pots.....	
7.4 Evaluation de l'effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes à l'égard de quelques agents phytopathogènes.....	70
7.4.1 Evaluation de l'effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes sélectionnées à l'égard de dix isolats de champignons phytopathogènes.....	73
7.4.2 Evaluation de l'effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes sélectionnées à l'égard de cinq souches de bactéries phytopathogènes.....	73
Conclusion générale et perspectives.....	74
Références bibliographiques.....	76
Annexes.....	79
	96

# *Introduction générale*

Tout au long de leur cycle de vie, les plantes et les agents pathogènes interagissent avec une grande variété d'organismes ; ces interactions peuvent affecter la santé des plantes d'une manière positive et/ou négative (**Corbaz, 1990; Nakkeeran et al., 2005**). On estime que près de 50 % de la production agricole mondiale est perdue avant ou après la récolte.

La lutte chimique par l'usage de pesticides de synthèse a toujours constitué la solution la plus appropriée à mettre en œuvre (**Aubertot et al., 2013**) pour la gestion des bio-agresseurs des cultures.

L'amélioration de la culture des plantes est un domaine en continuelle évolution dont l'objectif principal est de nourrir la planète (**Berge, 2011**).

L'agriculteur peut pallier les insuffisances du milieu par le biais des intrants chimiques qui ont montré leur efficacité sur le rendement des cultures et ont contribué au développement d'une agriculture intensive qui répond aux besoins alimentaires de la population.

Malheureusement, l'utilisation abusive de ces produits chimiques a eu des répercussions néfastes sur l'environnement et sur la santé humaine. A titre d'exemple, nous citons les risques de toxicité pour l'homme, liés aux résidus de pesticides dans les denrées alimentaires suite à une perte d'efficacité due à l'adaptation et/ou au développement de la résistance aux matières actives. Aussi, certains composés sous certaines conditions provoquent d'importants dommages environnementaux (des gaz à effet de serre...) (**El Guilli et al., 2009**).

Selon **Benhamou (2012)**, l'agriculture mondiale est aujourd'hui frappée par un courant qui favorise des pratiques plus durables et plus respectueuses de l'environnement. Pour répondre à ces nouvelles exigences, les agriculteurs doivent se tourner vers l'exploitation et la rentabilisation des ressources naturelles par le biais de pratiques agricoles combinant la performance et la protection des cultures à un moindre coût écologique.

**Benhamou & Picard (1999)** considèrent que la lutte contre les maladies des plantes cultivées se situe actuellement dans une phase de transition, tiraillée entre des tendances innovatrices inspirées par les progrès considérables des recherches fondamentales de ces dernières années et des tendances plus conservatrices associées à l'usage de produits chimiques .

Des solutions alternatives et/ou complémentaires reposant sur la protection de l'environnement et de la gestion des écosystèmes sont donc recherchées. Les connaissances sur la biologie de la rhizosphère ont progressé depuis les travaux de Hiltner en 1904 et se sont poursuivis jusqu'à maintenant.

L'intérêt actuel de l'association plante/micro-organismes bénéfiques n'est pas seulement motivé par le désir d'augmenter la productivité agricole mais aussi par la prise de conscience générale sur l'urgence de la protection de notre environnement (**Gouzou, 1992**).

**Choudhary et al. (2009)** considèrent que le contrôle biologique des maladies par l'introduction de micro-organismes bénéfiques dans la rhizosphère peut être une solution de rechange ou complémentaire à l'utilisation des produits chimiques de synthèse. Globalement, l'effet protecteur conféré par ces agents de lutte biologique est basé sur la compétition pour les nutriments essentiels, sur l'activité antagoniste vis-à-vis de la croissance des pathogènes via la production d'antibiotiques ou d'enzymes et /ou sur leur capacité à stimuler des systèmes de défense chez l'hôte végétal.

La compréhension des bases moléculaires des systèmes de défense des plantes et des stratégies des attaques microbiennes ont ouvert de nouvelles voies pour une agriculture durable et plus respectueuse de l'environnement (**Gust et al., 2010**). Ces dernières années, l'induction de la résistance par les microorganismes phytobénéfiques est largement exploitée (**Baluska & Ninkovic, 2010**).

En Algérie, pour améliorer les rendements et renforcer leurs potentiels productifs, les producteurs utilisent parfois de façon abusive des pesticides et engrais chimiques. Ces intrants agricoles ont contribué de manière significative à l'amélioration spectaculaire de la productivité et la qualité des cultures dans le monde, mais leurs effets sur la santé et sur l'environnement ne sont toujours pas étudiés, alors que les pays développés ont changé leurs systèmes de cultures en adoptant des mesures respectueuses de l'environnement. L'enjeu est donc de diminuer l'utilisation d'engrais coûteux et polluants en agriculture à travers l'utilisation de nouvelles associations bénéfiques dont la fonction est susceptible à priori d'intervenir dans la croissance et la santé des plantes.

En considérant ces hypothèses, des bactéries potentiellement promotrice de la croissance des plantes ont été recherchées dans des sols ou le blé est cultivé de façon intensive (**Heulin et al., 1991**). Ces dernières, exercent sur les plantes divers effets bénéfiques via la fixation de l'azote moléculaire ( $N_2$ ), la dissolution ou la chélation de diverses substances nutritives minérales, la synthèse de substances de croissance accessoires, et la destruction ou l'inhibition d'agents pathogènes (**Davet, 1996**).

Des recherches importantes ont porté ces dernières années sur des associations symbiotiques entre plantes et microorganismes qui naturellement facilitent la nutrition minérale des plantes et leur santé, il s'agit des associations :

Plantes/ champignons (c'est le cas le plus étudié) et Plantes/ bactéries PGPR (ce dernier cas a suscité l'intérêt de plusieurs travaux de recherches ces dernières années).

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif l'étude de l'interaction plante/bactérie dans la rhizosphère du blé. Il concerne :

- L'isolement et la sélection des souches rhizobactériennes des racines de blé dur.
- L'évaluation *in-vitro* des souches PGPR sur la germination des graines de blé parmi les principales variétés cultivées en Algérie.
- L'évaluation *in-vivo* des souches les plus prometteuses sur la croissance du blé utilisant deux modes d'application de l'inoculum.
- L'évaluation du pouvoir antagoniste des souches les plus prometteuses à l'égard de quelques bactéries et champignons phytopathogènes.

Pour répondre à ces objectifs, le présent travail s'articule autour de trois chapitres. Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les travaux portant sur les PGPR et leur utilisation comme bio fertilisants et bio pesticides. Le second chapitre décrit le matériel et les méthodes utilisés pour répondre aux objectifs de cette recherche.

Enfin, le troisième chapitre constitue une discussion générale synthétique qui met en relation les principaux résultats obtenus dans les différentes expériences et débouche sur une conclusion générale et les perspectives de cette étude.



*Synthèse  
bibliographique*

## I. Données sur la céréaliculture

### 1. Importance et situation de la céréaliculture dans le monde et en Algérie

La céréaliculture tient une place importante dans la production agricole. Le blé (*Triticum* sp.) est la céréale à paille la plus cultivée dans le monde, avec une production moyenne pour la période 2004-2010 d'environ 640 million de tonnes. Les cinq principaux pays producteurs de blé sont la Chine, l'Inde, les Etats-Unis d'Amérique, la France et la Russie (Stat. FAO, 2013).

En Algérie, la production du blé connaît des fluctuations interannuelles importantes (Figure 1) alors que la superficie emblavée, et parfois récoltée, a connu peu de variations.

Le déséquilibre qui existe entre la forte croissance démographique et la faible progression de la production ne peut qu'entraîner une dépendance de plus en plus accentuée vis à vis de l'extérieur (Djaouti, 2010). Dans cette situation, les importations jouent un rôle clé dans l'approvisionnement du marché national des céréales et tout particulièrement du blé (Abis *et al.*, 2009). Les importations des céréales ont totalisé 3,16 milliards de dollars en 2013 avec des quantités importées atteignant 10,03 millions de tonnes, indique le Centre National de l'Informatique et des Statistiques (CNIS) de la Douane Algérienne. D'où, la nécessité d'utilisation de techniques modernes pour augmenter la production en céréales (Algérie Presse Service, 2014).

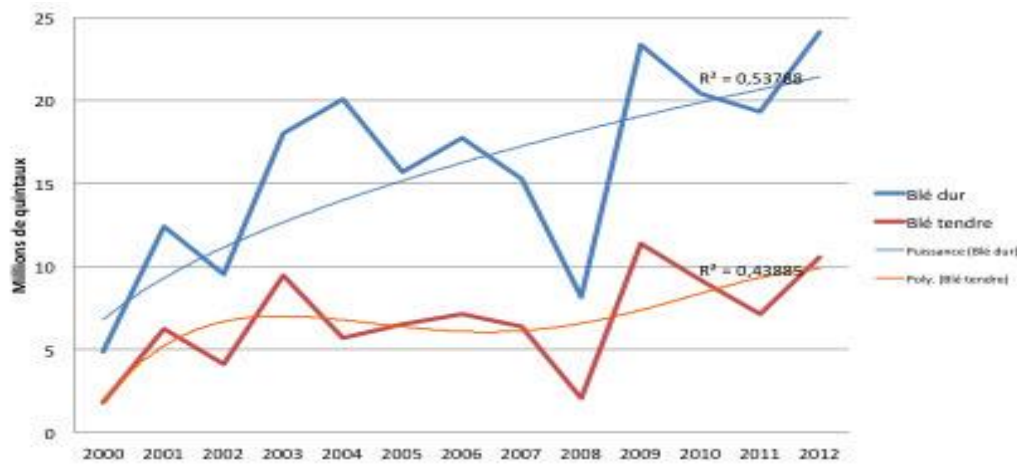


Figure 1 : Evolution de la production nationale de blé en Algérie.

Source : MADR, Alger, 2013 in (Rastoin & Benabderrazik, 2014)

## **2. Facteurs limitant la production des céréales en Algérie**

Les causes liées à la faiblesse des rendements peuvent se diviser en 4 causes principales :

- Le milieu physique (ou conditions naturelles) ;
- Les techniques de culture ;
- Les politiques agricoles ;
- Facteurs biotiques : les maladies des céréales et plus particulièrement celles des blés peuvent être regroupées selon les symptômes qu'elles induisent et les parties qu'elles affectent en :

### **a) Maladies causant des symptômes localisés sur le feuillage**

- **Rouilles**

Selon les enquêtes menées par **Bendif (1994)** et **Sayoud *et al.* (1996)**, trois espèces de rouilles attaquent le blé : Rouille brune (leaf rust) causée par *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* ; la Rouille noire (stem rust) causée par *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* et la Rouille jaune (stripe rust) causée par *Puccinia striiformis*.

- **Septorioses (*Septoria Leaf Blotch*)**

Deux espèces de septorioses s'attaquent au blé : *Septoria tritici* connue aussi sous le nom de la tache septorienne et *Septoria nodorum* responsable de la septoriose des feuilles et des épis.

- **Helminthosporioses (*Tan Spot*)**

Cette maladie est largement répandue dans les zones céréalières, elle est causée par *Pyrenophora tritici-repentis* et apparaît sous forme de taches chlorotiques au niveau du limbe des feuilles. Des nécroses sont aussi observées sous forme de losanges bordés par des zones chlorotiques.

- **Oidium (*Powdery Mildew*)**

Cette maladie est causée par *Erysiphe graminis* f. sp. *tritici* et apparaît sous forme d'un duvet blanchâtre ou gris pâle sur les limbes des feuilles basales, puis se développe sur les feuilles des étages supérieures.

**b) Maladies causant des pourritures racinaires**

Pourritures racinaires ou du pied ou encore la pourriture commune, sont des appellations décrivant une même maladie due à différents agents fongiques : *Fusarium* spp, *Cochliobolus sativus* et *Microdochium nivale*. Ces derniers sont les principales causes de la fente des semis, de la pourriture de la base de la tige et la brûlure de l'épi, ainsi que la pourriture du collet qui est très dangereuse car elle produit des lésions nécrotiques dans les tissus des jeunes plantes (Sayoud *et al.*, 1996 ; Hadjout *et al.*, 2014).

**c) Maladies causant des symptômes sur les épis et sur les graines**

▪ **Charbon nu (*Loose Smut*)**

Causée par *Ustilago tritici*, cette maladie se développe aussi bien sur les blés tendres que les blés durs. Les épis atteints sont noirs et apparaissent plus tôt que les épis sains.

▪ **Caries (*Common unt*)**

Maladie causée par *Tilletia caries*. Les symptômes apparaissent au stade de remplissage du grain, le contenu de celui-ci est transformé en une masse poudreuse noire.

**d) Autres ravageurs**

Les principaux ravageurs, adventices et maladies du blé en Algérie sont représentés dans le tableau 1 :

**Tableau 1.** Les principaux ravageurs, adventices et maladies du blé en Algérie (Source : Djebari, 2005 ; Hammadache, 2013).

Bio-agresseurs	Nom scientifique
<b>Bactéries</b>	<i>Rathayibacter tritici</i> ; <i>Erwinia rhapontici</i> ; <i>Xanthomonas campestris</i> . <i>X. translucens</i> ; <i>Pseudomonas viridiflava</i> ; <i>Pseudomonas fuscovaginae</i> ; <i>Pseudomonas syringae</i>
<b>Virus</b>	BYDV (Barley Yellow Dwarf Virus) WSMV (Wheat Streak Mosaic Virus) WSSMV (Wheat Spindle Streak Mosaic Virus) BSMV (Barley Stripe Mosaic Virus)
<b>Nématodes</b>	<i>Heterodera avenae</i>
<b>Adventices</b>	<i>Avena sterilis</i> L. (Folle avoine) ; <i>Phalaris paradoxa</i> L. (L'alpiste) ; <i>Sinapis arvensis</i> L. (Moutarde des champs) ; <i>Medicago polymorpha</i> L. (Luzerne)
	Les insectes (la punaise des céréales)

<b>Ravageurs</b>	Les oiseaux (les moineaux, la tourterelle) Les rongeurs (les rats des champs et les souris)
------------------	--

### **3. Dégâts et nuisibilité**

L'importance des dégâts est intimement liée au type de culture, à la région et surtout aux conditions climatiques. En Algérie, plusieurs travaux menés au cours des deux dernières décennies signalent l'importance des dégâts causés par les différents agents pathogènes (**Khalfi, 2011; Hadjoutet al., 2014**). Plusieurs auteurs ont mis en évidence la production de plusieurs types de mycotoxines par les espèces du genre *Fusarium* (plus de 70 espèces) dont beaucoup produisent un large éventail de mycotoxines, et les groupes les plus importants sont les trichothécènes et les fumonisines (**Moretti, 2014**). En plus de leurs effets sur la santé, les mycotoxines altèrent les qualités physique et technologique des produits résultant de grains fusariés (**Duc & Bezet, 2003**).

### **4. Moyens de lutte**

Pour faire face à ces limitations et à l'utilisation abusive des produits phytosanitaires qui ont soulevé de grands problèmes écologiques, le contrôle biologique des maladies par l'introduction de micro-organismes bénéfiques est proposé comme une solution alternative ou complémentaire à l'utilisation des produits chimiques de synthèse.

Plusieurs microorganismes ont montré leur efficacité dans la protection des cultures contre différents agents pathogènes. Ils ont été exploités comme inoculants pour l'induction de la résistance systémique chez les plantes, le biocontrôle, la biofertilisation et la phytostimulation (**Choudhary et al., 2009**). Les genres *Bacillus*, *Lysobacter* et *Pseudomonas* sont les agents bactériens les plus étudiés (**Yuen et al., 2007**).

## II. La rhizosphère

### 1. Définition

La rhizosphère, volume de sol soumis à l'influence des racines, est définie aussi comme la couche de sol qui adhère fermement aux racines des plantes (**Beattie, 2006**). Elle est le siège d'intenses processus physico-chimiques induits par l'activité racinaire qui sont capables d'influencer le transfert sol-plante des métaux (**Bravin, 2008**).

Le terme rhizosphère fut utilisé pour la première fois par **Lorenz Hiltner** en 1904. Le terme rhizosphère signifie étymologiquement *rhiza* "racine" et *sphera* "ce qui entoure".

Dans le monde végétal, les racines représentent la partie de la plante responsable de l'absorption d'eau et de nutriments. Elles servent aussi à l'ancrage au sol et à la diffusion dans la rhizosphère de composés très diversifiés.

Bien que la plupart des parties des sols soient pauvres en nutriments, la rhizosphère est très riche en ces éléments. Les exsudats racinaires relâchés durant le métabolisme cellulaire, ou diffusés dans la rhizosphère sous forme de molécules à grand ou à faible poids moléculaire comme le mucilage (hydrates de polysaccharides, acides organiques, vitamines, et acides aminés) et des lysats cellulaires. Ces derniers représentent un excellent substrat pour le développement microbien dans la rhizosphère (**Beattie, 2006**).

Selon **Pedro (2007)**, la rhizosphère est ainsi une niche écologique qui « éveille » et stimule les diverses activités microbiennes qui participeront très significativement au fonctionnement du cycle de nutriments majeurs et des oligo-éléments et aux transformations qui conduiront à des transferts vers les plantes, les eaux, l'atmosphère. Selon **Gobat et al., (2003)** in **Pedro (2007)**, la rhizosphère serait le théâtre de processus de transformation de minéraux (par exemple, altération,...) intervenant dans le cycle des éléments associés au cycle de l'eau et dont les acteurs et leurs jeux sont encore bien mal connus.

### 2. La communauté microbienne de la rhizosphère

La rhizosphère, zone du sol très riche en nutriments entourant la racine (**Beattie, 2006**), est colonisée naturellement par des bactéries et champignons bénéfiques (champignons mycorrhiziens à arbuscules et trichoderma) qui améliorent le développement des végétaux

(Lugtenberget *al.*, 2013). Dans la rhizosphère, les bactéries sont les organismes les plus nombreux (leur densité est de l'ordre de plus de  $10^9$  cellules par gramme de tissus des racines de plantes) (Beattie,2006), et les plus variés (la notion d'espèce bactérienne est un concept très controversé jusqu'à présent) (Philippot *et al.*, 2010 in Berge,2011). Selon Kennedy *et al.*(2005), une caractérisation complète des populations bactériennes nécessite plusieurs échantillons et l'utilisation d'analyses moléculaires couteuses qui exigent beaucoup de temps et d'efforts.

L'association, le rôle et les effets que les rhizobactéries exercent sur la plante sont fonction du succès de leur établissement dans la rhizosphère; elles peuvent avoir un effet positif, négatif ou neutre sur la croissance des plantes (Beauchamp, 1993).

Hirt (2012),indique qu'à l'heure actuelle, l'étendue et la spécificité des associations existantes entre différentes espèces de plantes et certaines familles de microbes sont encore méconnues.Les champignons peuvent héberger des bactéries et des virus qui peuvent affecter le résultat de l'association plantes-microorganismes. Par exemple,une association mutualiste entre un champignon endophyte et une herbe de panique tropical permet aux deux organismes de se développer à des températures élevées du sol. Le champignon contient un virus qui est nécessaire pour conférer une tolérance de chaleur à ses plantes-hôtes. Dans ce cas, les isolats fongiques guéris du virus sont incapables de conférer une tolérance à la chaleur(Marquez *et al.*, 2007).

Hirt(2012), rajoute queles preuves actuelles démontrent un niveau de complexité supplémentaire des interactions souche spécifique au sein des espèces, ce qui suggère l'existence de mécanismes d'associations très spécifiques et complexes entre les plantes et les microbes.

Les microorganismes rhizosphériques incluant les symbiotes (rhizobia, actinobactéries et champignons mycorhiziens) et les saprophytes libres qui améliorent la disponibilité des nutriments et la synthèse des substances de croissance des plantes et/ou suppriment les pathogènes (Klopper *et al.*, 1999;Berg *et al.*, 2005; Lugtenberget *al.*, 2013) font l'objet de nombreuses recherches.

Près de 5% des rhizobactéries favorisent la croissance des plantes et les protègent contre les agents pathogènes (Suslow, 1982; Weller, 1988 inBeauchamp, 1993).

### 3. Les bactéries bénéfiques

Différentes appellations sont retenues pour décrire les bactéries bénéfiques : **PGPB** "Plant-Growth-Promoting-Bacteria", subdivisés en deux groupes : biocontrol PGPBs et PGPBs (Bashan & Holognin, 1997 in Podile & Kishore, 2006) et peuvent provenir de différentes niches écologiques telles que la rhizosphère, la spermosphère, la phyllosphère, voire même de l'anthosphère ou de la carposphère (Beattie, 2006); **RFCP** "Rhizobactéries qui Favorisent la Croissance des Plantes", stimulent directement la croissance de celles-ci en augmentant le prélèvement des éléments nutritifs du sol, en induisant et produisant des régulateurs de croissance végétale et en activant les mécanismes de résistance induite chez les végétaux (Beauchamp, 1993 ; Erturket *et al.*, 2010) ; **YIB** "Yield-Increased Bacteria" (Chen *et al.*, 1996); ou encore **EPR** "Emergence- Promoting Rhizobacteria" pour les espèces qui améliorent la germination des graines lorsque les conditions d'environnement sont défavorables (Kloepper *et al.*, 1986).

Plusieurs travaux ont montré l'utilité des bactéries bénéfiques pour la promotion de la croissance végétale (Tran Van *et al.*, 1996 ; Erturk *et al.*, 2010 ; Shamsuddin *et al.*, 2010) et la protection des cultures contre les infections par les agents pathogènes (Meziane *et al.*, 2005 ; Nakkeeran *et al.*, 2005 ; Pal *et al.*, 2006). Les RFCP les plus étudiées sont des *Pseudomonas* fluorescents, des *Bacillus*, des *Azospirillum*, des *Azotobacter*, des *Klebsiella*, des *Enterobacter*, des *Rhizobium* et des *Serratia* spp. (Kloepper *et al.*, 1980 ; Bakker *et al.*, 1991 ; Choudhary *et al.*, 2009).

#### 3.1. Les bactéries rhizosphériques en tant qu'organismes stimulateurs de la croissance des plantes

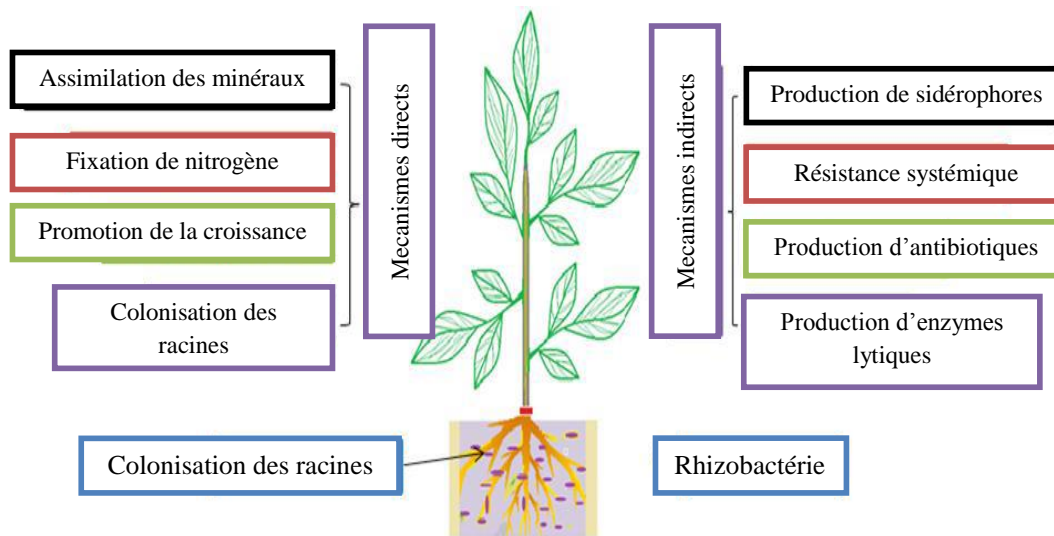
Les microorganismes rhizosphériques en général, et les rhizobactéries promotrices de la croissance (PGPR) en particulier, exercent sur les plantes divers effets bénéfiques : la fixation de l'azote moléculaire (N<sub>2</sub>), la dissolution ou la chélation de diverses substances nutritives minérales, la solubilisation du phosphore insoluble (Gupta *et al.*, 2000 ; Podile & Kishore, 2006).

Ce sont aussi des organismes ayant la faculté de produire ou de changer la concentration des régulateurs de croissance tels que, l'acide gibbérellique, les cytokinines, et l'éthylène ainsi que la production d'auxine qui modifie la croissance racinaire, production d'exopolysaccharides qui diminuent l'effet des stress chimiques ou hydriques, etc.... Ces déterminants



sont multiples et peuvent aussi concerner des échanges de signaux moléculaires (Berge,2011). Khakipour *et al.* (2008) indiquent que les microorganismes capables de produire des hormones peuvent appartenir aux genres *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Bacillus*, *Enthrobacter* et des champignons mycorrhiziens.

Les mécanismes d'action des PGPR sont regroupés en mécanismes directs et indirects (Figure 2) (Lugtenberg & Kamilova, 2009; Ngoma *et al.*, 2012). Ces différents mécanismes peuvent se produire simultanément ou séquentiellement (Gupta *et al.*, 2000).



**Figure 2.** Représentation schématique des mécanismes d'action directe et indirecte employés par les PGPR (Ngoma *et al.*, 2012).

Durant ces dernières décennies, l'utilisation des microorganismes bénéfiques est devenue une alternative pour améliorer la production agricole (Berg *et al.*, 2005).

### 3.1.1. Synthèse de phyto-hormones

Les phytohormones qui peuvent être produites par des microorganismes, jouent un rôle important dans les interactions hôte-parasite et en particulier la régulation de la croissance des plantes (Mezaache, 2012).

#### 3.1.1.1. Les cytokinines

Les cytokinines forment une classe de phytohormones qui stimulent les divisions cellulaires, l'élargissement et le développement des tissus. Le passage de la phase G2 de

l'interphase à la mitose se trouverait stimulé par cette substance (**Mok & Mok, 2001; Garcia de Salamone et al., 2001**). La production de cytokinines a été rapportée chez *P. fluorescens* (**Garcia de Salamone et al., 2001**).

### **3.1.1.2. Acide Indole-3-acétique (AIA)**

Auxine = acide-indol-3-acétique noté IAA ou AIA. Il existe différents dérivés de cette molécule (**Gaspar et al., 1996**). Son transport est polarisé : il s'effectue préférentiellement depuis l'apex caulinaire vers les racines surtout par le phloème. L'effet sur l'élongation cellulaire représente la fonction principale de l'auxine. Cet effet est variable selon la concentration et selon l'organe (**Jaimes-Miranda, 2006**). Dans l'interaction plante/bactérie, l'AIA semble être l'hormone de croissance la plus importante (**Barazani & Friedman, 1999**). Plusieurs espèces bactériennes sont capables de produire l'auxine et/ou l'éthylène, de cytokinine et de gibbérelline (**Van Loon, 2007**). Aussi, il est intéressant de noter que ces molécules sont des signaux impliqués dans l'association plante/bactérie, ils peuvent être employés pour stimuler les mécanismes de défense (**Spaepen et al., 2007**). Des découvertes récentes montrent également l'implication des cytokinines (**Garcia de Salamone et al., 2001**) et des gibbérellines (**Dalton & Kramer, 2006**) produites par les rhizobactéries dans la régulation de la croissance végétale.

### **3.1.1.3. Éthylène (ETH : H<sub>2</sub>C=CH<sub>2</sub>)**

Un certain nombre de bactéries peuvent également favoriser la croissance des plantes et les protéger contre des stress abiotiques (salinité, sécheresse, chaleur...), ces contraintes environnementales peuvent être la cause de la production d'éthylène hormonal chez les plantes, qui se traduit par des réactions d'inhibition de la croissance (**Hirt, 2012**).

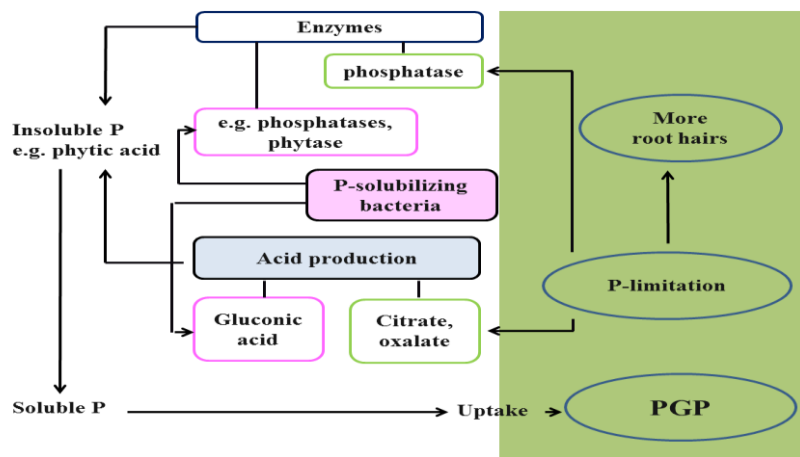
L'éthylène est un gaz volatil qui se propage par diffusion. Il est connu pour être l'hormone des blessures, du gel, de la sécheresse, de la pollution atmosphérique et des attaques par des microorganismes (**Salisbury, 1994; Kozłowski & Pallardy, 1997**). Cette substance, produite par les plantes, a la fonction de lever la dormance et de stimuler la germination (**Glick et al., 1999**).

- Certaines espèces bactériennes sont capables de baisser le niveau de l'éthylène par hydrolyse de son précurseur le 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) aminocyclopropane par l'enzyme ACC désaminase (**Fuentes-Ramirez & Caballero-Mellado, 2005**), ce qui permet de supprimer son action inhibitrice du développement racinaire.

Les *Pseudomonas* spp. fluorescents sont des producteurs d'AAC-désaminase (Glick *et al.*, 1994). La concentration en éthylène est même considérée comme un bon facteur pour indiquer le début et le degré de stress d'une plante (Kozłowski & Pallardy, 1997). L'amélioration de la croissance des plantes par les PGPR ( par inhibition de l'éthylène) a été rapportée chez le maïs cultivé sous stress salin(Nadeem *et al.*, 2006).

### 3.1.2. Solubilisation des phosphates

Le phosphore est considéré comme élément minéral essentiel à la nutrition des plantes, il se trouve avec de faibles niveaux sous une forme disponible dans différents sols agricoles (Martínez-Vivero *et al.*, 2010). Le phosphore est disponible pour les plantes sous forme d'ions  $H_2PO_4^-$  et  $HPO_4^{2-}$ . Les micro-organismes sont impliqués dans une série de processus qui influent sur la transformation du phosphore du sol (P) et sont donc partie intégrante du cycle de P du sol (Figure 3). Diverses bactéries ont la capacité de solubiliser le phosphore organique par l'action de phosphatase, ou le phosphore inorganique par la libération d'acides organiques, dont les plus puissants appartiennent aux genres *Bacillus*, *Enterobacter*, *Erwinia* et *Pseudomonas* (Lugtenberger *et al.*, 2013). Des gènes impliqués dans le processus de minéralisation des différentes sources de phosphore organique ; avec différents mécanismes pour la solubilisation des formes insolubles de phosphore (phosphatase, phytase) par des souches rhizobactériennes promotrices de la croissance des plantes ; ont été isolés et caractérisés (Rodriguez *et al.*, 2006).



**Figure 3.** Contribution des microorganismes à la nutrition des plantes en P (Lugtenberger *et al.*, 2013). Couleurs: verte, (plante); rose, (microbes); bleu: (processus)

Les plantes réagissent à la limitation du phosphore par acidification de la rhizosphère, par augmentation de la croissance de racines vers les zones de sol non exploitées, en augmentant le nombre de poils absorbants, et en sécrétant des phosphatases. L'acidification est le résultat de la sécrétion d'anions organiques avec les protons. Les anions organiques, avec du citrate et oxalate étant plus efficaces que d'autres, peuvent directement faciliter la mobilisation de phosphate (**Richardson, 2009**).

### **3.1.3. Production d'Exo-polysaccharides**

Selon **Heulin & Achouak (2012)**, les travaux sur les bactéries productrices d'EPS, et plus particulièrement les populations bactériennes qui sont stimulées dans la rhizosphère des plantes, ont historiquement démarré au Lemire dans les années 1980 dans le cadre du programme de recherche « Essor des biotechnologies » (1983-1987). La rhizosphère des plantes est une source de nouvelles bactéries produisant des EPS inconnus qui ont des propriétés variées sur le sol (**Berge, 2011**).

Selon **Amellal et al. (1999)**, l'inoculation d'un sol rhizosphérique avec des souches productrices d'EPS induit une modification significative des propriétés physiques du sol qui permettent :

- a/ Une augmentation de la masse du sol adhérent aux racines par rapport à la masse du tissu racinaire.

Selon **Alami et al. (2000)**, l'inoculation des plantules de tournesol avec *Rhizobium* sp. (souche YAS34) a provoqué une augmentation significative de la RAS par masse sèche des racines (jusqu'à 100%) et a permis de modifier la structure du sol autour du système racinaire, ce qui a permis de lutter contre l'effet négatif du déficit hydrique sur la croissance. En utilisant l'engrais azoté sous forme de nitrate  $\text{NO}_3^-$ , l'inoculation des plantes de tournesol par la même souche a permis une utilisation plus efficace d'engrais en augmentant l'absorption d'azote par les plantules de tournesol.

- b/ Une augmentation de la taille et de la stabilité des agrégats, et une modification de la porosité du sol.

Il a été démontré que les EPS bactériens produits à la surface des racines contribuent également au maintien du film d'eau nécessaire à l'activité photosynthétique et à la croissance des plantes. Les EPS bactériens, en condition de stress hydrique dans le sol, permettent de

limiter/retarder la dessiccation du milieu (**Heulin & Achouak., 2012**). Au-delà de l'intérêt agronomique, ces EPS représentent aussi un fort potentiel de valorisation pour les industriels des filières de la cosmétique, de l'agro-alimentaire et de la pharmacie (**Berge, 2011**).

### **3.1.4. Fixation de l'azote moléculaire**

Le nitrogène (N) est le principal élément nutritif des plantes. Les microorganismes capables de fixer biologiquement l'azote jouent un rôle crucial, ils sont appelés 'diazotrophes' ou 'diazotrophiques' puisqu'ils réduisent l'azote moléculaire ( $N_2$ ) en ammonium ( $NH_4$ ) grâce à leur spécificité enzymatique, la nitrogénase (**Martínez-Viveros et al., 2010**). Ces systèmes comportent diverses espèces bactériennes, aérobiques (*Azobacter*, *Beijerinckia*,...), anaérobiques facultatives (*Pseudomonas*, *Rhizobium*,...), hétérotrophes (*Klebsiella*, *Enterobacter*, ...) et phototrophes (*Roseobacter*, *Erythrobacter*,...). Selon **Kennedy et al. (2006)**, la fixation biologique de l'azote par ces bactéries améliore le développement végétatif ainsi que le rendement en grains de différentes plantes en C3 et C4 (blé, riz, canne à sucre, et coton...) d'une manière significative.

En se basant sur les relations spatiale et fonctionnelle entre ces diazotrophes qui ne forment pas de nodules avec la plante hôte, **Beattie (2006)** a réparti les systèmes diazotrophiques en deux grands groupes :

- (i) les diazotrophes exophytes regroupant toutes les bactéries vivant en dehors d'une plante (comme le genre *Azospirillum* et *Klebsiella*);
- (ii) les diazotrophes endophytes incluant toutes bactéries vivant à l'intérieur d'une plante hôte (Exemple : association de *Gluconacetobacter diazotrophicus* et *Herbaspirillum* spp. chez la canne à sucre).

La fixation non symbiotique de l'azote a été l'un des premiers mécanismes bactériens identifiés et étudiés dans la rhizosphère des végétaux. Le riz (*Oryza sativa* L.) est l'une des céréales les plus cultivées dans le monde. De nombreux auteurs ont montré que l'inoculation du riz par des bactéries PGPR (fixatrices d'azote ou non) a augmenté significativement la hauteur et le nombre de talles des plantes et du rendement en grains. L'interaction entre l'inoculation par des bactéries fixatrices d'azote et l'apport d'azote n'est pas significative. Cette observation a déjà été faite par de nombreux auteurs sur différentes céréales comme le riz, le maïs et le blé (**Tran Van et al., 1994**).

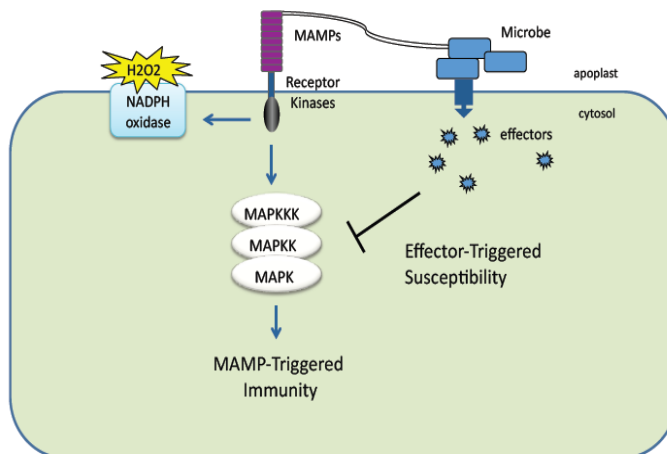
### 3.2. Les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes(PGPR) en tant qu'agents de lutte biologique

En plus de leurs effets bénéfiques sur la stimulation de la croissance des plantes par les différents mécanismes : directs et indirects, qui améliorent l'assimilation des éléments nutritifs, certaines bactéries PGPR possèdent de nombreuses caractéristiques qui permettent leur utilisation dans la protection des cultures contre les infections par les agents phytopathogènes. La plupart des souches bactériennes exploitées comme bio pesticides appartiennent aux genres *Agrobacterium*, *Bacillus* et *Pseudomonas* (Haas & Defago, 2005).

#### 3.2.1. Reconnaissance des bactéries PGPR par la plante hôte

La perception de la bactérie par la plante hôte est le premier niveau de reconnaissance, responsable du devenir de l'interaction microorganisme/plante hôte. Des molécules signales (éliciteurs bactériens) sont à la base de la reconnaissance de la bactérie par la plante : les flagelles bactériens (la flagelline protéine du filament flagellaire des bactéries), les autres types de molécules permettant la reconnaissance spécifique des bactéries, sont les lipopolysaccharides (LPS). La reconnaissance spécifique de *Pseudomonas* PGPR se fait sans induction de la réponse hypersensible (HR) (Gómez-Gómez *et al.*, 1999 ; Meziane *et al.*, 2005). Il est capable d'induire une résistance locale induite (LIR), ainsi qu'une réponse systémique induite ISR (Jourdan *et al.*, 2008). D'autres molécules comme les sidérophores, les antibiotiques et l'acide salicylique permettent à la bactérie de coloniser la plante tout en la protégeant contre d'éventuels pathogènes.

Hirt(2012) indique que la mise en place de véritables interactions plantes/microorganismes nécessite la reconnaissance mutuelle et une orchestration (Figure 4) considérable des réponses à la fois chez les plantes et les microbes.



**Figure 4 :** Le système immunitaire des plantes en interaction avec des microbes (Hirt, 2012).

Les plantes utilisent des récepteurs immunitaires afin de détecter les microbes et déclenchent des réactions de défense appropriées. Des kinases de récepteurs de la membrane plasmique reconnaissent des molécules microbiennes (MAMP = Microbe-Associated Molecular Pattern) comme les flagelles bactériens et lancent une série de réactions de défense telles que l'activation des cascades de kinases MAP, la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) et le déclenchement de l'immunité (MTI= MAMP-triggered immunity). Cette zone de l'immunité est souvent très efficace pour stopper la colonisation de la plupart des microbes pathogènes potentiels. Agents pathogènes et microbes bénéficiaires qui établissent avec succès une interaction avec la plante hôte ont évolué des effecteurs qui sont livrés à la cellule de la plante hôte pour supprimer l'immunité MTI, un processus connu sous le nom d'ETI (Effector-Triggered Immunity)

### 3.2.2. Modes d'action des PGPR en lutte biologique

Les modes d'action des agents microbiens dans le bio contrôle ne sont pas toujours bien connus et peuvent varier pour un micro-organisme donné, en fonction du pathosystème sur lequel ils sont appliqués. Mais de nombreux exemples décrivant d'un ou de plusieurs mécanismes responsables de la réduction de la maladie sont disponibles (Adam, 2008).

#### 3.2.2.1. Interactions directes PGPR/Pathogène

##### 3.2.2.1.1. Compétition trophique et spatiale

Généralement, l'effet protecteur conféré par les agents de lutte biologique est basé sur la compétition pour les nutriments essentiels. Un cas particulier de compétition pour les nutriments repose sur la compétition pour le fer.

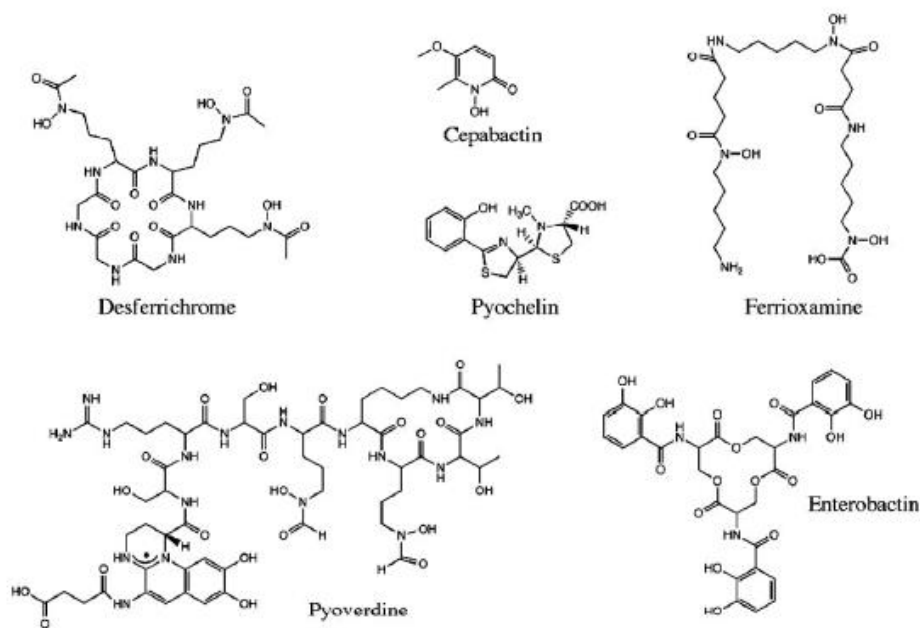
##### a) Compétition trophique (les sidérophores)

Malgré son abondance dans le sol, le fer représente un micro-élément difficilement disponible pour les microorganismes de la rhizosphère. Les bactéries vivant dans le sol ont développé

une stratégie pour l'acquérir. En effet, les ions ferriques ( $Fe^{3+}$ ) ne sont présents dans le sol qu'à des concentrations avoisinant  $10^{-18}$  M (Mercado-Blanco & Bakker, 2007).

Le mot sidérophore, issu du grec, signifie sidéros = fer et phore = porteur. L'utilisation des sidérophores représente chez les bactéries l'un des systèmes les plus efficaces pour l'acquisition du fer (Mezaache, 2012).

Les sidérophores sont très importants pour la croissance et la survie des bactéries, ce sont des molécules chélatrices du fer qui ont une très haute affinité pour les ions ferriques. Ils jouent un rôle crucial dans l'expression des gènes de virulence et le développement des biofilms par différents microorganismes. Ainsi, les sidérophores peuvent être classifiés en trois catégories, selon les groupes fonctionnels qu'ils utilisent comme liaison aux ions  $Fe^{+3}$ , ces groupes sont des catécholates (ou phénolates), des hydroxamates (ou carboxylates) et des types mixés (Saha *et al.*, 2012). Les Pyoverdines sont des sidérophores complexes (Figure 5), produites par les *Pseudomonas fluorescents* (Ravel & Cornelis, 2003 ; Cornelis *et al.*, 2008).



**Figure 5.** Exemples de Sidérophores classés selon leurs groupements fonctionnels catécholates, hydroxamates et types mixés (Saha *et al.*, 2012)



**b) Compétition spatiale**

La réduction de la maladie peut être le résultat d'une colonisation importante des racines par les bactéries bénéfiques, ce qui réduit le nombre de sites habitables pour les micro-organismes pathogènes et par conséquent, leur croissance. Certaines souches de *Pseudomonas fluorescens* sont dotées d'une capacité agressive à coloniser les racines des plantes (Haas & keel, 2003).

Persello-Cartieaux *et al.* (2003), indiquent qu'une corrélation entre l'importance de la population de PGPR sur les racines et la protection observée n'est pas toujours vérifiée et ne peut donc pas être considérée comme une règle générale.

**3.2.2.1.2. Antibiose**

L'antibiose par définition est l'inhibition de l'agent phytopathogène par la production des métabolites secondaires par un autre micro-organisme. Ces métabolites sont capables d'interférer avec la germination, la croissance mycélienne, la physiologie cellulaire et/ou la sporulation des agents phytopathogènes (Lepoivre, 2003). Cook *et al.* (1995), ont focalisé leurs recherches sur les maladies racinaires du blé causées par le champignon *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*, ainsi que des bactéries bénéfiques isolées de la rhizosphère du blé. Des résultats significatifs ont été obtenus suite à l'emploi de ces rhizobactéries suite à leurs pouvoir à synthétiser une gamme variée d'antibiotique. Cette production est influencée par des facteurs abiotiques qui correspondent à la composition du sol en matière organique, l'humidité du sol et le pH. Les facteurs biotiques qui sont surtout liés à l'interaction de l'agent antagoniste avec la plante et la microflore du sol, peuvent aussi influencer la production d'antibiotique (Duffy & Defago, 1999 ; Lugtemberg *et al.*, 2002).

La production semble optimale *in-vitro* dans le cas d'une densité microbienne élevée et dans des conditions de croissance limitée (Haas & Kell, 2003).

Pour que l'antibiose soit considérée comme l'un des modes d'action d'un agent de lutte biologique, il faut que la molécule en question soit isolée à partir du site d'action de ce dernier et que son action soit mise en évidence avec l'usage de mutants ne la produisant pas. Les PGPR montrent non seulement un large spectre de diversité dans le type mais également dans le nombre d'antibiotiques produits (Raaijmakers *et al.*, 2002).

Un antibiotique est un métabolite produit à faible concentration qui détruit ou inhibe la croissance d'un organisme.

a) Métabolites Secondaires possédant des propriétés de bio-contrôle (les antibiotiques)

La production de substances antibiotiques par les microorganismes est un phénomène fréquent et capable de contrôler plusieurs espèces fongiques phytopathogènes comme *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*, *Pythium* sp., *Polyporus* sp., *Rhizoctonia solani*, et les bactéries pathogènes comme *Actinomyces viscosus*, *Bacillus subtilis*, *Erwinia amylovora*. (Khan et al., 2005; Van Rij et al., 2005).

Plusieurs antibiotiques ont été déterminés, ils incluent le 2,4- diacetylphloroglucinol (DAPG), le cyanure d'hydrogène HCN un métabolite essentiel dans le biocontrôle par les *Pseudomonas*, l'oomycine A, la phénazine, la pyolutéorine, la pyocyanine, la pyrrolnitrine, la tropolone ou encore des lipopeptides cycliques (viscosinamide, tensine, amphisine...), beaucoup d'entre eux, ont été identifiés chez le genre *Pseudomonas*, (Raaijmakers et al., 2002 ; Mercado-Blanco & Bakker, 2007 ; De Coste et al., 2010;).

La figure 6 présente les principaux antibiotiques produits par les souches de bio contrôle du genre *Pseudomonas*. D'après cette figure, les principaux antibiotiques produits par les souches de biocontrôle jouent un rôle central entre les éléments impliqués dans les interactions : *Pseudomonas* de biocontrôle, plantes, pathogènes, prédateurs, coopérateurs et sol (Mezaache, 2012).

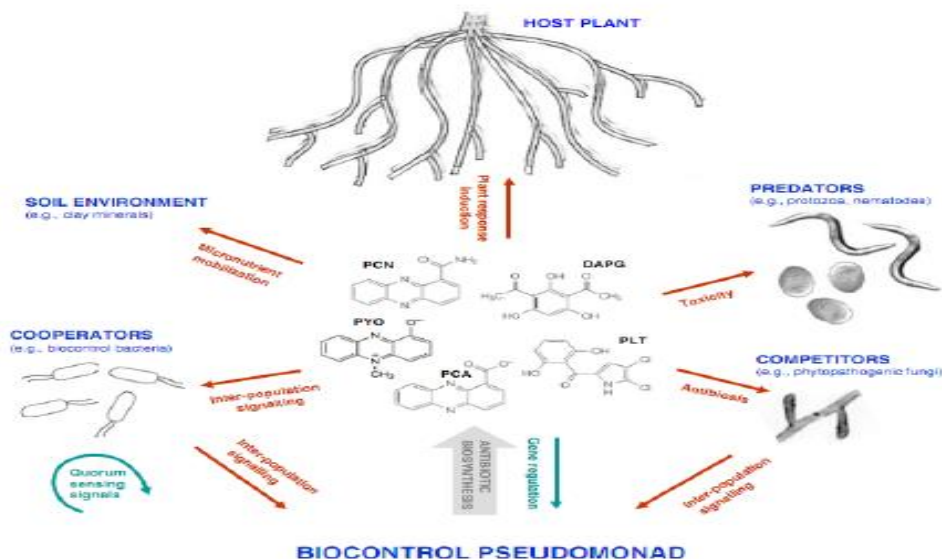


Figure 6. Les principaux antibiotiques produits par les souches de *Pseudomonas* de biocontrôle (Mezaache, 2012).

PCA : phénazine-1-carboxylate, PYO : pyocianine, PCN : phénazine-1-carboxamide,  
DAPG : 2-4, diacétyl phloroglucinol, PLT : pyolutéorine.

**b) Facteurs influant la production d'antibiotiques et leurs efficacités**

Les incohérences dans la production des antibiotiques sont attribuées à la participation de facteurs biotiques et abiotiques. Ces facteurs comprennent: les facteurs physiques (pH, la température et l'humidité du sol, éléments nutritifs), l'acétylation, la variation de la sensibilité, la concentration cellulaire et la phase de croissance (**Fernando *et al.*, 2005**).

**3.2.2.1.3. Parasitisme**

Le parasitisme consiste en l'interaction directe entre deux microorganismes phylogénétiquement indépendants qui coexistent sur une période de temps prolongée. Dans ce type d'association, un organisme (appelé hôte) est blessé ou tué par un autre (appelé parasite). Les activités des différents hyperparasites, à savoir, les agents qui parasitent les agents pathogènes des plantes, peuvent conduire à la lutte biologique contre les agents pathogènes les plus virulents à travers la stimulation des systèmes de défense de l'hôte (**Pal, 2006**).

Le parasitisme effectué par certains microorganismes, agents de la lutte biologique PGPR, à travers la production d'enzymes hydrolytiques (chitinases) conduit à la lyse des cellules et inhibe ainsi le développement du champignon (**Podile & Kishore, 2006**).

▪ **Enzymes dégradant les parois fongiques**

L'un des mécanismes d'action des PGPR (les bactéries PGPR endophytes ou exophytes) est leur capacité à excréter des enzymes lytiques qui peuvent attaquer la croissance des agents pathogènes (**Compant *et al.*, 2005**).

La Chitinase, la  $\beta$ -1,3 glucanase et la cellulase, lipases et d'autres enzymes lytiques sont d'importantes enzymes spécialement dans le contrôle fongique, par leurs activités dégradatives des composés des parois cellulaires tels que : la chitine, le  $\beta$ 1-3 glucane et les ponts glucosidiques (**Beattie, 2006**).

*Bacillus subtilis* réduit les populations de *Pythium ultimum* et *Rhizoctonia solani* par sécrétion de glucanases et de protéases (**Paulitz & Bélanger, 2001**).

La production des chitinases extracellulaires par *Serratia marcescens* a été rapportée comme agent de biocontrôle efficace contre *Sclerotium rolfsii* (Ordentlich & Elad, 1988 in Compant *et al.*, 2005).

#### **3.2.2.1.4. Atténuation de la virulence des pathogènes**

Ce mécanisme correspond à une détoxification et/ou une inhibition de la synthèse des facteurs de virulence des pathogènes. Certaines bactéries, appartenant aux genres *Pseudomonas* sp., *Streptomyces* sp., ou *Ralstonia* sp. sont capables de dégrader diverses toxines fongiques (acide fusarique, anthroquinone, thaxtomine A).

Certaines souches de PGPR ont la capacité d'excréter des métabolites qui jouent un rôle important dans l'inactivation des facteurs de germination du pathogène ou la dégradation de leurs facteurs de pathogénicité comme les toxines (Gnanamanickam & Immanuel, 2006).

#### **3.2.2.2. Interactions indirectes PGPR/Plante**

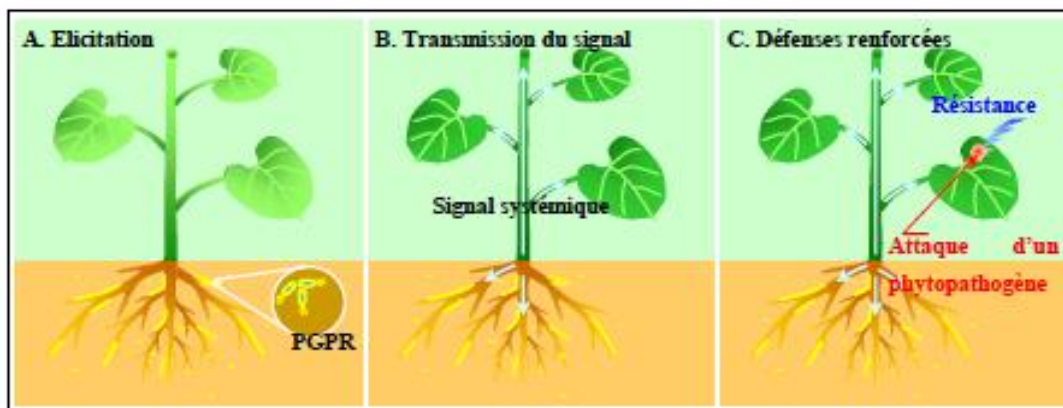
La suppression des maladies chez les plantes peut avoir lieu à travers un antagonisme microbien, ou une induction de la résistance. Certaines souches de PGPR peuvent protéger les plantes d'une façon indirecte par la stimulation de mécanismes de défense inductibles dans la plante, ce qui peut rendre l'hôte beaucoup plus résistant à l'agression future par des agents pathogènes. Ce phénomène a été nommé «Résistance Systémique Induite» (ISR, Induced Systemic Resistance) (Pieterse *et al.*, 2002 ; Van Loon, 2007).

##### **3.2.2.2.1. La résistance systémique induite ou ISR (Induced Systemic Resistance)**

La reconnaissance par la plante de certaines bactéries de la rhizosphère peut conduire à une réaction d'immunisation lui permettant de mieux se défendre vis-à-vis d'une attaque ultérieure par un organisme pathogène (Jourdan *et al.*, 2008). Des souches de bactéries sélectionnées de la rhizosphère ont la capacité de réduire les maladies par l'activation d'un mécanisme de résistance dans les plantes nommé Résistance Systémique Induite (ISR) (Pieterse, 2000). Pour agir efficacement en tant qu'inducteurs de résistance, les PGPR devaient avoir la capacité de coloniser les tissus racinaires sans causer de dommages structuraux (Benhamou & Picard, 1999). Utilisé en combinaison avec d'autres approches phytosanitaires, ce phénomène d'induction de résistance systémique (ISR) par les rhizobactéries est considéré comme une stratégie prometteuse dans la lutte biologique contre les maladies des cultures (Jourdan *et al.*, 2008). Les mécanismes développés par les plantes

permettent de se protéger contre un large spectre de pathogènes du sol, d'autres qui ciblent les parties aériennes et même contre certains virus (Ongena & Thonart, 2006).

L'ISR peut être divisée en trois étapes principales qui sont la perception par la plante des molécules bactériennes responsables de l'élicitation de l'ISR (Figure 7) ; la transmission du signal nécessaire à la systémisation du phénomène chez la plante ; la mise en alerte (priming) de la plante au niveau systémique, qui dans la plupart des cas n'est pas accompagnée de grandes modifications de l'activité transcriptionnelle avant l'attaque du pathogène. L'expression du ou des mécanisme (s) de défense sensu stricto induits, permettant de limiter voire d'inhiber la pénétration du pathogène dans les tissus de l'hôte végétal (Ongena & Thonart, 2006; Jourdan *et al.*, 2008).



**Figure 7.** La résistance systémique induite chez les plantes par des rhizobactéries

Les trois étapes principales sont : (A) : L'élicitation ; (B) : La transmission du signal. (C) : L'expression du ou des mécanisme (s) de défense (Ongena & Thonart, 2006)

#### 3.2.2.2.1.1 Les éliciteurs de l'ISR

Aussi appelés déterminants bactériens, les éliciteurs sont des molécules de natures variées capables de déclencher une cascade d'événements menant à l'expression des réactions de défense chez la plante. Les molécules élicitrices de l'ISR peuvent être soit des composants de la surface cellulaire bactérienne, soit des métabolites excrétés par les PGPR (Van Loon & Bakker, 2005; Ongena & Thonart, 2006).

##### d) Les flagelles bactériens

Sont des organes responsables de la mobilité bactérienne constitués de sous-unités d'une protéine, la flagelline (**Baudry & Brézellec, 2006**). Il a été démontré dans les travaux menés par **Meziane et al. (2005)** que la flagelline de la rhizobactérie *P. putida* WCS358 isolée de la rhizosphère de la pomme de terre est impliqué dans la stimulation des capacités défensive chez *Arabidopsis thaliana*. La reconnaissance entre les éliciteurs rhizobactériens et la plante est spécifique, elle implique une structure active de la flagelline et un récepteur transmembranaire de type LRR-kinase (**Gómez-Gómez et al., 1999**).

**e) Les lipopolysaccharides (LPS)**

Les LPS sont des composants majeurs de la paroi cellulaire ( $1 \times 10^5$  molécules de LPS par  $\mu\text{m}^2$ ) des bactéries gram négatives (**Dow et al., 2000**), ils contribuent avant tout à la croissance et à la survie des microorganismes sur les plantes en facilitant la colonisation (**Newman et al., 1995**). Cependant, une activité élicitrice des LPS ou, plus spécifiquement, de la chaîne latérale O-antigénique, a été montrée sur différentes plantes (**Reitz et al., 2002; Meziane et al., 2005**). Les LPS induisent l'activation d'événements précoces, l'accumulation de protéines PR et le dépôt de callose (**Gerber & Dubery, 2004**). Le pouvoir éliciteur des LPS de PGPR varie avec la plante hôte. Par exemple, *P. putida* WCS358 est capable d'induire l'ISR via le LPS dans plusieurs plantes telles que le haricot, la tomate mais pas chez le radis et *Arabidopsis* (**Meziane et al., 2005**).

**f) Métabolites sécrétés**

▪ **Les sidérophores**

Les sidérophores, produits par les PGPR dans des conditions de carence en fer, peuvent déclencher l'ISR dans certaines plantes. Les pyoverdines et la pyochéline sont des sidérophores synthétisés typiquement par le genre *Pseudomonas* et pour lesquels une activité élicitrice de l'ISR a été démontrée (**Budzikiewicz, 2004**). Cette résistance sidérophore-induite est associée à l'expression de réactions typiques de défense, telles que l'induction de gènes de défense ou l'accumulation de protéines PR (**Maurhöfer et al., 1994 ; Dellagi et al., 2005**).

▪ **Les antibiotiques**

Certaines bactéries Gram positives telles que *Bacillus* spp. ont montré 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**). Les composés volatils organiques, et plus particulièrement le 2,3-butandiol, étaient les seuls déterminants de l'ISR

connus chez *Bacillus* (Ryu *et al.*, 2004). La production du DAPG par *P. fluorescens* CHA0 semble être impliquée dans l'induction de cette résistance systémique (Iavicoli *et al.*, 2003). Un rôle dans l'induction de l'ISR de la pyocyanine a été rapporté lors du traitement des plantes de tomate par *P. aeruginosa* 7NSK2 (Audenaert *et al.*, 2002). Récemment, l'application de souches de *B. subtilis* mutantes surexprimant un ou deux antibiotiques, la fengycine et la surfactine, conduit à l'expression d'une ISR chez la tomate et le haricot contre *B. cinerea* (Ongena *et al.*, 2007).

### **3.2.2.1.2. Voies de signalisation hormonale de la résistance**

Les mécanismes de défense des plantes sont régulés par un réseau complexe des voies de signalisation, impliquant plusieurs régulateurs (Bruce *et al.*, 2007). Trois molécules signales clés sont responsables dans l'induction de la résistance chez les plantes : l'acide salicylique (AS), l'acide jasmonique (AJ) et l'éthylène (Pieterse *et al.*, 2002).

#### **a) Voie dépendante de l'acide salicylique**

L'acide salicylique est un régulateur clé de la SAR, l'induction de cette résistance nécessite l'accumulation de l'AS (Ton *et al.*, 2002; Yan *et al.*, 2002). Certaines souches de PGPR sont capables de produire de l'acide salicylique (SA) sous des conditions limitantes en fer. Dans certains cas, l'acide salicylique d'origine bactérienne joue le rôle d'éliciteur de l'ISR. Par exemple, le SA produit par la souche *P. aeruginosa* 7NSK2 élicite l'ISR dans quelques pathosystèmes tels que tabac/virus de mosaïque du tabac (TMV) (De Meyer *et al.*, 1999), haricot/*Botrytis cinerea* et *Colletotrichum lindemuthianum* (De Meyer & Höfte, 1997; Bigirimana & Höfte, 2002). Un mutant de la souche *P. aeruginosa* 7NSK2 qui n'est plus capable de produire le SA, a perdu sa capacité à stimuler l'ISR chez le haricot (De Meyer & Höfte, 1997).

#### **b) Voie indépendante de l'acide salicylique**

L'analyse du niveau local et systémique de l'acide jasmonique et de l'éthylène a démontré que l'ISR n'est pas associée à un changement de la teneur de ces molécules signales, ce qui indique que l'ISR n'induit pas la synthèse de ces phytohormones (Pieterse *et al.*, 2000). Plusieurs études suggèrent que le rôle de l'AJ et l'ET dans l'ISR est basé sur une sensibilité accrue à ces hormones, plutôt que sur une augmentation de leur production

### **3.2.3. Régulation du métabolisme secondaire**

### 3.2.3.1. Deux composants du système de régulation

#### a) Le système GacS/GacA

Le senseur kinase GacS et le régulateur de réponse GacA font partie d'un système à deux composants qui est présent dans une grande variété de bactéries gram-négatives et qui a été étudié principalement chez les bactéries entériques et encore chez *Pseudomonas fluorescens*

Le système gacS / GacA contrôle la production de métabolites secondaires et des enzymes extracellulaires impliquées dans la pathogénicité pour les plantes et les animaux, la lutte biologique contre les maladies du sol des plantes, l'adaptation écologique, ou tolérance au stress (Heeb & Haas, 2001).

GacS est une protéine transmembranaire typique qui répond aux stimuli environnementaux par une autophosphorylation des acides aminés, qui se transfère de GacS à l'acide aminé de GacA. Le régulateur GacA contient un motif de liaison à l'ADN, qui peut activer ou réprimer les gènes directement par la liaison au promoteur du gène cible (Aarons *et al.*, 2000; Fernando *et al.*, 2005).

Le système GacS/GacA est impliqué dans la régulation post transcriptionnelle des métabolites extracellulaires de lutte biologique (Haas *et al.*, 2002), au niveau de l'initiation de la traduction (Blumer *et al.*, 1999). L'implication du système GacS/GacA dans la transduction du signal a été vérifiée par l'utilisation des mutants gacS/gacA, chez *P. fluorescens* Pf-5 (Hassan *et al.*, 2010).

Chez la souche *Pseudomonas fluorescens* CHA0 de biocontrôle, la voie de transduction du signal Gac / Rsm contrôle positivement la synthèse de métabolites secondaires et les exoenzymes antifongiques. De cette façon, le système à deux composants GacS / GacA détermine l'expression de trois petits ARN régulateurs (rsmX, rsmY et rsmZ) dans un processus activé par les molécules de signalisation propres à la souche, qui ne sont pas liés aux lactones N-acyl-homosérine (Dubuiset *et al.*, 2006).

#### b) Les protéines LuxI et LuxR de régulation

Une large famille du système de régulation de la production de métabolites secondaires chez *V. fischeri* similaire aux protéines LuxI et LuxR existe (Fernando *et al.*, 2005).



### 3.2.3.2 Facteur Sigma

Un autre niveau de régulation implique les facteurs sigma qui est une composante entière comme Phl et Plt chez *P. fluorescens* Pf-5 (**Fernando et al., 2005**). D'autres formes de régulation globale ont été rapportées: des activateurs et des répresseurs transrationnels spécifiques *phlF* ainsi que des régulateurs de l'ARNm (*PrrB*) sont nécessaires pour la régulation de la transcription des gènes des métabolites de bio contrôle (**Aarons et al., 2000 ; Delany et al., 2000**). Chez *P. fluorescens*, l'expression de 2,4-diacetylphloroglucinol (PHL) et la pyoluteorine est contrôlée positivement par les régulateurs de transcription PhlF et PltR, respectivement (**Brodhagen et al., 2004; Maurhofer et al., 2004**). Les gènes responsables de la synthèse des antibiotiques sont très conservés chez les *Pseudomonas*(**Fernando et al., 2005**).

### 3.2.4. Quorum Sensing(QS)

Le QS est un mécanisme de communication complexe entre les cellules (**Choudhary, 2009**). Il est utilisé par de nombreuses bactéries afin de surveiller leur densité de population et pour réguler l'expression des gènes (**Keller & Surette, 2006**). Ce dernier implique la production de molécules signales telles que des N-acyl-hornoserine lactone (AHL) pour les bactéries Gram-négatives et les molécules peptidiques de signalisation pour les bactéries à Gram-positif (**Walker, 2003 ; Steindler et al., 2008**). Ce sont des molécules auto inductrices qui s'accumulent dans le milieu extracellulaire, lorsque leur nombre atteint un seuil de concentration critique (le quorum), la réponse se déclenche en menant à l'expression des gènes (**Sharma et al., 2003; Choudhary, 2009**).

Le système régulateur *gacS* et *gacA* contrôle aussi le QS, illustrant ainsi la complexité de la régulation de la production des antibiotiques chez les *Pseudomonas* fluorescents. Les gènes des facteurs sigma, *rpoD* et *rpoS* sont aussi impliqués dans le contrôle de la production de tels antibiotiques, et augmentent les activités antagonistes des *Pseudomonas fluorescents* (**Mezaache, 2012**). Selon **Choudhary (2009)**, les bactéries bénéfiques responsables de la fixation de l'azote, utilisent le QS pour optimiser la formation des nodules sur les racines des plantes. De nouvelles avancées et une meilleure compréhension de QS dans la rhizosphère facilitera l'exploitation de l'inoculum dans le domaine de la production agricole et dans les stratégies de bioremédiation pour l'environnement.

#### 4. Utilisation des PGPR en agriculture

Durant les années 1950 jusqu'à 1980, les travaux réalisés sur la bactérisation des sols par des bactéries bénéfiques sous forme de suspensions bactériennes ou en enrobage des semences, n'était pas satisfaisante car les principales bactéries utilisées appartenaient principalement aux espèces de *Azotobacter chroococcum* et *Bacillus megaterium* var *phosphaticum* (Cooper, 1959; Brown, 1974 in Lemanceau, 1992). Cependant, actuellement, diverses formulations bactériologiques sont commercialisées et sont utilisées à grandes échelles et pour différentes espèces végétales. Grâce au progrès technologique, une grande part des travaux de recherche est réalisé sur les rhizobactéries appartenant au groupe des *Pseudomonas* fluorescents qui sont capables de solubiliser le phosphate, de produire des antibiotiques antifongiques, des chitinases, de  $\beta$ -1,3 glucanase, des acides salicyliques et cyanhydriques (HCN), des sidérophores...etc.

Les espèces appartenant aux genres *Azoarcus* et *Azospirillum* connus pour leurs capacité à fixer librement l'azote de l'air (sans formation de nodosités) peuvent remplacer l'utilisation abusive d'engrais azotés de synthèses (Bhattacharjee *et al.*, 2008; Bashan & de-Bashan, 2010).

L'emploi des organismes bénéfiques en agriculture est confronté à un problème majeur qui rend le succès de l'implantation des PGPR incertain dans le sol, c'est la survie des bactéries (Beauchamp, 1993).

#### 5. La survie des bactéries après inoculation

L'activité bénéfique de certaines souches bactériennes suite à leur inoculation dans un sol brut peut être limitée par plusieurs facteurs, le plus essentiel est la faible compétence rhizosphérique des bactéries introduites. L'étude du devenir d'une population bactérienne introduite dans une rhizosphère est très importante, la compréhension des premières étapes de l'établissement de l'association PGPR-plante est une étape nécessaire afin d'optimiser les succès de la colonisation racinaire et l'expression du principe actif. Dans la plupart des cas, une chute du nombre de bactéries introduites est rapportée (Albrecht *et al.*, 1983; Vanselsas *et al.*, 1989; Heynen *et al.*, 1988 in Gouzou, 1992), rappelant le rôle des facteurs biotiques et abiotiques du sol sur la dynamique des populations bactériennes. Une espèce bactérienne introduite dans un sol stérile se développe rapidement pouvant atteindre des densités élevées, alors que l'inoculation de la même espèce dans un sol non stérile est

généralement suivie par une chute de la population introduite pouvant aller jusqu'à la disparition de celle-ci (**Danso et al., 1975; Acea et al., 1988 in Gouzou,1992** ).

## **6. Formulation et méthodes d'application des PGPR**

La formulation des produits à base d'organismes bénéfiques est un domaine important de la recherche microbiologique qui concerne la mise au point de formulations qui permettrait de préserver l'activité microbienne pour une longue période(**Ramamoorthy et al., 2001**). Bien que les souches de *Pseudomonas fluorescens* ont grandement contribué à la compréhension des mécanismes qui sont impliqués dans la suppression de la maladie, ces dernières présentent un inconvénient du point de vue application (elles perdent généralement leur viabilité lorsqu'elles sont conservées pendant une période de plusieurs semaines) (**Haas & Defago, 2005**). Par contre, les bacilles en raison de leurs capacité à former des endospores résistantes au changement des conditions du milieu offrent un avantage par rapport aux autres bactéries pour la formulation du produit (**Raaijmakers et al., 2002 ;Cavaglieri et al.,2005**).Malgré cela, il existe peu d'exemples d'application réussie d'inoculants microbiens. Essentiellement, un manque de rendement constant dans différentes conditions environnementales sur le terrain a empêché leur utilisation plus large(**Richardson et al., 2009**).

Diverses formulations existent pour les bio-pesticides à base de bactéries PGPR, notons que les plus intéressantes sont : la suspension bactérienne et les formulations en poudre (**Ramamoorthy et al., 2001**).L'application commerciale de PGPR en vue d'accroître la santé des cultures ou à gérer les maladies des plantes dépend du développement commercial des formulations avec des supports appropriés qui favorisent la survie des bactéries pour une période de temps considérable. Les porteurs peuvent être soit organiques ou non organique. Les supports organiques utilisés pour le développement de formulation comprennent la tourbe, le gazon, du talc, la lignite, la kaolinite, la pyrophyllite, la montmorillonite, l'alginate et la vermiculite, etc.... (**Nakkeeran et al., 2005**).Ces porteurs augmentent le taux de survie des bactéries en les protégeant de la dessiccation et la mort des cellules.Notons que l'utilisation de composte sec comme formulation a augmenté la survie de plusieurs PGPR jusqu'à 12 mois (**Haggag & Saber,2000**).

## 7. Principaux travaux réalisés sur les PGPR en grandes cultures

De nombreux travaux ont été consacrés ces dernières années à l'utilisation des bactéries du sol pour l'amélioration de la croissance des plantes et la diminution des intrants chimiques polluants en agriculture.

- Le riz (*Oryza sativa* L.) est l'une des céréales les plus cultivées dans le monde. Des essais d'inoculation du riz avec des bactéries PGPR ont entraîné une augmentation significative de la hauteur des plantes, des biomasses racinaires et aériennes et du rendement en grains (Tran Van *et al.*, 1994; Achouak *et al.*, 1999; Picard *et al.*, 2008). En Egypte, des résultats ont montré que l'inoculation par des PGPR fixatrices d'azote n'est bénéfique qu'avec des souches adaptées aux conditions locales, et seulement lorsque le facteur limitant est l'azote.
- L'inoculation de ray-grass avec les isolats de G3Dc4 (*Achromobacter* sp.) et G2Ac10 (*Sphingomonas* sp.) a permis une augmentation de 47-97% de la biomasse aérienne (Castanheira *et al.*, 2013).
- Concernant les céréales, Parmi les populations rhizosphériques, celles possédant la propriété de fixer librement l'azote de l'air (sans formation de nodosités) ont fait l'objet de recherches importantes. Des travaux ont montré que les populations fixatrices d'azote les plus abondantes et les plus actives, appartenaient au genre *Bacillus* et plus particulièrement aux espèces *Bacillus polymyxa* et *Bacillus circulans* (Berge *et al.*, 2011).

Achouak *et al.* (1999) ont étudié la phylogénie moléculaire des gènes de l'ADNr16S (*rrs*) et de la nitrogénase, enzyme de la fixation d'azote (*nifH*), et ont montré que le genre *Paenibacillus* est le seul à héberger des espèces contenant des bactéries fixatrices d'azote.

En Algérie, des populations de *Paenibacillus polymyxa* ont été isolées de la rhizosphère du blé dur sur cinq sols algériens ; le premier site était un sol mis en culture de blé dur cultivés sur une durée de 5 à 26 ans (Hamiz, H5 et Z26), 70 ans (Alger, D70), et plus de 2 000 ans pour deux sites à Tiaret (T2000 et K2000). Ces sols avaient été choisis pour leur histoire de culture du blé. Le nombre de souches isolées a été d'autant plus important que la culture du blé était ancienne ce qui reflète une baisse d'abondance de *P. polymyxa* dans les cultures les plus jeunes (Guemouri-Athmani, 2000).

### *Synthèse bibliographique*

- **Mezaache (2012)** a isolé un certains nombre de bactéries PGPR de la rhizosphère de pomme de terre qui ont montré un pouvoir antagoniste, *in vitro*, vis-à-vis de bactéries et de phytopathogènes fongiques. Ces isolats, se sont en effet révélés producteurs de métabolites tels que les sidérophores, HCN, phosphatases, acide salicylique, AIA, bactériocines et d'autres composés antimicrobiens.

# *Matériels et méthodes*



## 1. Prélèvement des échantillons

Durant le mois de février 2012, des échantillons ont été prélevés dans des cultures de blé dur au stade début à plein tallage dans différents sites de la Wilaya de Bouira (**Tableau 2**, **Figure 8**).

Les variétés de blé échantillonnées, leurs dates de semis et leurs précédents culturaux sont mentionnés dans le tableau 2.

**Tableau 2.** Les différentes variétés de blé dur utilisées.

Sites de prélèvement	Détails	Variétés	Date de -semis	Date de prélèvement	Précédent cultural	
El khabouzia	Ferme pilote Boubakeur saidi commune de Ain Bessam	Chen's G4	05/11/2011	19/02/2012	Blé dur	
		Chen's G3	07/11/2011			
Ain El Aloui	Ferme pilote Safa Zakar commune de Ain Bessam	OuarsenisG3	13/11/2011		13/11/2011	Jachère travaillée
		Ouarsenis G3				
Bouira	Ferme privée, commune de Bouira Lieu dit 'Oued El Berdi'	Chen's consommation	25/12/2011		25/12/2011	Blé dur
		Chen's consommation				

Au niveau de chaque site, les prélèvements ont été effectués sur 2 parcelles prises au hasard. Dans chaque parcelle, 10 plantules de blé ont été prélevées avec leurs mottes. Au total, 60 plants ont été prélevés et ont été par la suite transportés au laboratoire et conservés à 4°C jusqu'à leur utilisation dans un délai maximal de 72h.





**Figure 8.** Les différents sites de prélèvement des échantillons de blé dur.

## 2. Isolement des rhizobactéries

Les isollements ont été réalisés au laboratoire des phanérogames parasites à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie (ENSA). Le matériel végétal, se présentant sous forme de touffes de plantules de blé, ces dernières ont été fortement secouées de manière à enlever le sol adhérent à leurs racines. Les racines ont été par la suite sectionnées à l'aide d'un scalpel stérile en portions de 2 à 3cm de longueur (**Figure 9**).



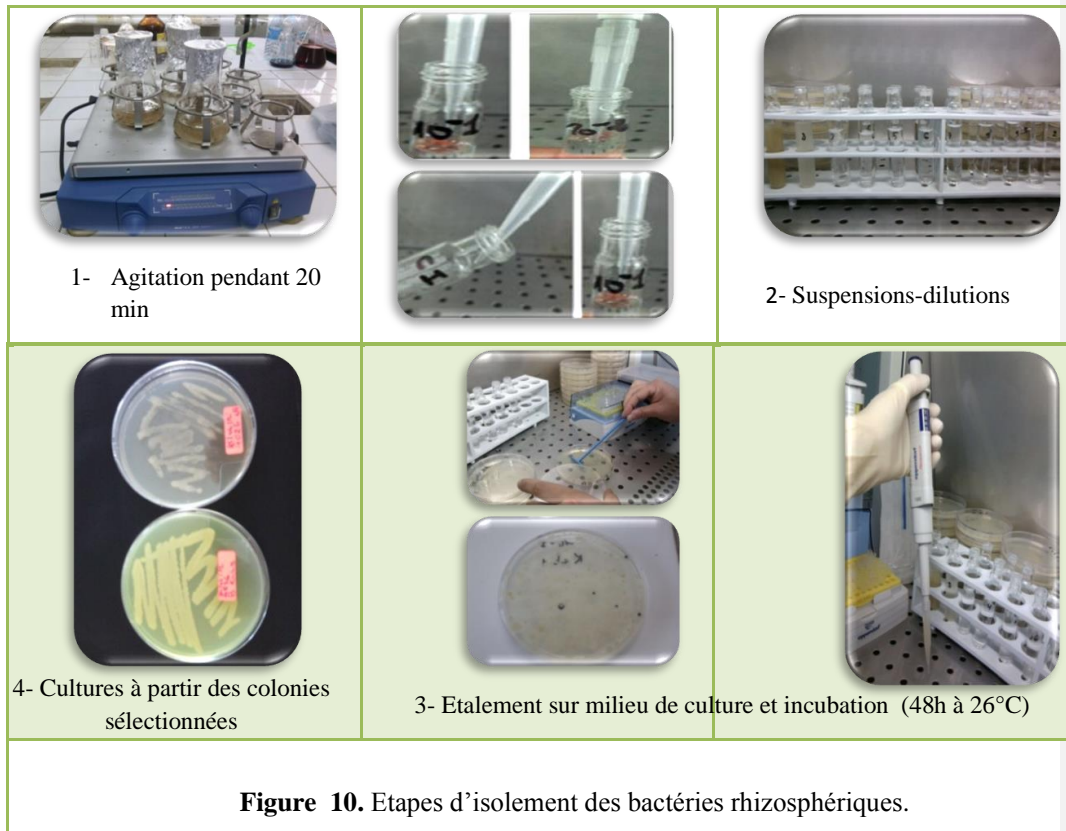
**Figure 9.** Le matériel végétal utilisé.

### 2.1. Méthode d'isolement

L'isolement des bactéries a été effectué par la méthode des suspensions-dilutions. Dans des fioles stériles de 250 ml de capacité, 10 g de racines (de chaque échantillon) et leur sol adhérent ont été suspendus dans 100 ml d'eau physiologique stérile. L'ensemble des fioles ont subi une agitation à 150 tours par minute pendant 20 minutes sur un agitateur orbital.

Une série de dilutions au  $1/10^{\text{ème}}$  a été réalisée à partir de chaque échantillon en prélevant 1ml de la solution initiale et le plaçant dans 09 ml d'Eau Distillée Stérile (EDS) dans un tube à essai stérile, puis de chaque dilution, la même opération est répétée jusqu'à l'obtention de la dilution  $10^{-10}$ . Deux suspensions-dilutions ont été réalisées pour chaque échantillon.

L'isolement a consisté à prélever  $100\mu\text{l}$  de solutions appartenant aux dilutions de  $10^{-3}$  à  $10^{-9}$  à l'aide d'une micropipette, puis à les étaler sur le milieu de culture (Nutrient Agar) dans des boites de Pétri stériles (**Figure 10**). Afin d'inhiber la croissance fongique, 16,6 mg/l de cycloheximide (Sigma®) filtré stérile ont été rajoutés au milieu de culture après autoclavage. Les boites de Pétri portant les indications nécessaires (origine de l'échantillon, espèce cultivée, dilution) ont été incubées à  $26^{\circ}\text{C}$  pendant 48 heures.



**Figure 10.** Etapes d'isolement des bactéries rhizosphériques.

## 2.2. Sélection des colonies bactériennes

Après 48h d'incubation à 26°C, les colonies d'apparences différentes développées sur le milieu NA non sélectif, ont été sélectionnées en se basant sur des critères morphologiques (**Annexe 1**).

La caractérisation phénotypique traditionnelle est toujours admise comme étape primordiale pour la séparation des bactéries nouvellement isolées. L'isolement des bactéries sur le milieu non sélectif nous a permis de distinguer 26 colonies bactériennes issues des racines des plantules de blé dur. Les souches sélectionnées ont été codées (**Tableau 3**) puis cultivées, sous des conditions d'asepsie, dans de nouvelles boites de Pétri sur le milieu Nutrient Agar. Après 48h d'incubation, uniquement 22 souches bactériennes ont fait l'objet d'une purification par étalement en stries sur le même milieu de culture.

Tableau 3. Les différentes souches bactériennes isolées

Code des souches bactériennes	Origine
BCh11 BCh12 BCh13 BCh14	Bouira Blé dur variété Chen's parcelle n°1
BCh21 BCh22 BCh23 BCh24	Bouira Blé dur variété Chen's parcelle n°2
KCh11 KCh12 KCh13 KCh14 KCh15	Khabouzia Blé dur variétéChen's parcelle n°1
KCh21 KCh22 KCh23 KCh24 KCh25	Khabouzia Blé dur variété Chen's parcelle n°2
AO11	Ain El Aloui Blé dur variété Ouarsenis parcelle n°1
AO21 AO22 AO23 AO24 AO25 AO26 AO27	Ain El Aloui Blé dur variété Ouarsenis parcelle n°2

### **3. Evaluation des souches rhizobactériennes pour leur activité stimulatrice de la croissance végétale**

#### **3.1. Préparation de l'inoculum**

Les souches rhizobactériennes sélectionnées ont été cultivées individuellement sur le milieu Nutrient Agar. Après 48h d'incubation à 22°C, les cultures bactériennes ont été collectées par addition de l'EDS dans chaque boîte et raclage à l'aide d'un étaleur stérile.

#### **3.2. Désinfection des graines de blé dur**

Les graines de blé dur (variété Chen's) ont subi une désinfection superficielle par trempage à deux reprises dans l'hypochlorite de sodium à 2% pendant 2 min, et rinçage abondant à l'EDS après chaque trempage. Dans des conditions d'asepsie, les graines désinfectées ont été séchées dans du papier buvard stérile puis dispersées dans des boîtes de pétri.

#### **3.3. Evaluation *in-vitro* de l'effet de 22 souches rhizobactériennes sur la germination de la variété Chen's de blé dur**

Un test préliminaire sur la germination des graines d'une seule variété de blé dur, var. Chen's, a été réalisé dans des boîtes de pétrie où 20 graines désinfectées ont été placées sur du papier filtre Whatman (8,5 cm de diamètre) stérile et imbibé par 5 ml d'une suspension des souches bactériennes, provenant de cultures âgées de 48h, appliquées individuellement. Chez le témoin, 5ml d'EDS ont été rajoutés par boîte. Trois répétitions par traitements ont été réalisées. Les boîtes ont été maintenues humides et mises à incubation à 22°C pendant 72 heures. Le pourcentage de germination et la longueur du coléoptile ont été calculés et les données ont été analysées statistiquement pour déterminer les souches stimulatrices de la croissance.

#### **3.4. Evaluation *in vitro* de trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la germination et la longueur du coléoptile de cinq variétés de blé dur**

A l'issue du test préliminaire, 3 souches rhizobactériennes codées AO21, AO24 et AO26 ont été sélectionnées puis testées sur les variétés de blé dur les plus cultivées en Algérie, à savoir Chen's G3, Maghres, GTA, Mansoura et Massinissa. Pour ce faire, 20 graines de chaque variété de blé désinfectées ont été placées sur du papier filtre Whatman (8,5 cm de diamètre) stérile et imbibé par une suspension de chacune des souches

rhizobactériennes (5 ml par boîte) appliquées individuellement. Le traitement du témoin a reçu la même quantité d'EDS. Trois répétitions par traitement ont été réalisées.

Après 4 jours d'incubation, le pourcentage de germination et la longueur du coléoptile pour chaque graine ont été calculés. Les données ont été analysées statistiquement.

### **3.5. Evaluation de l'activité stimulatrice de la croissance des trois souches rhizobactériennes en pots**

En se basant sur les résultats du test mené *in vitro*, la variété de blé dur *Massinissa* a été retenue pour un essai *in situ* (en pot) effectué le 12/07/2012 dans le but d'évaluer la capacité des trois souches rhizobactériennes sélectionnées à promouvoir sa croissance végétale

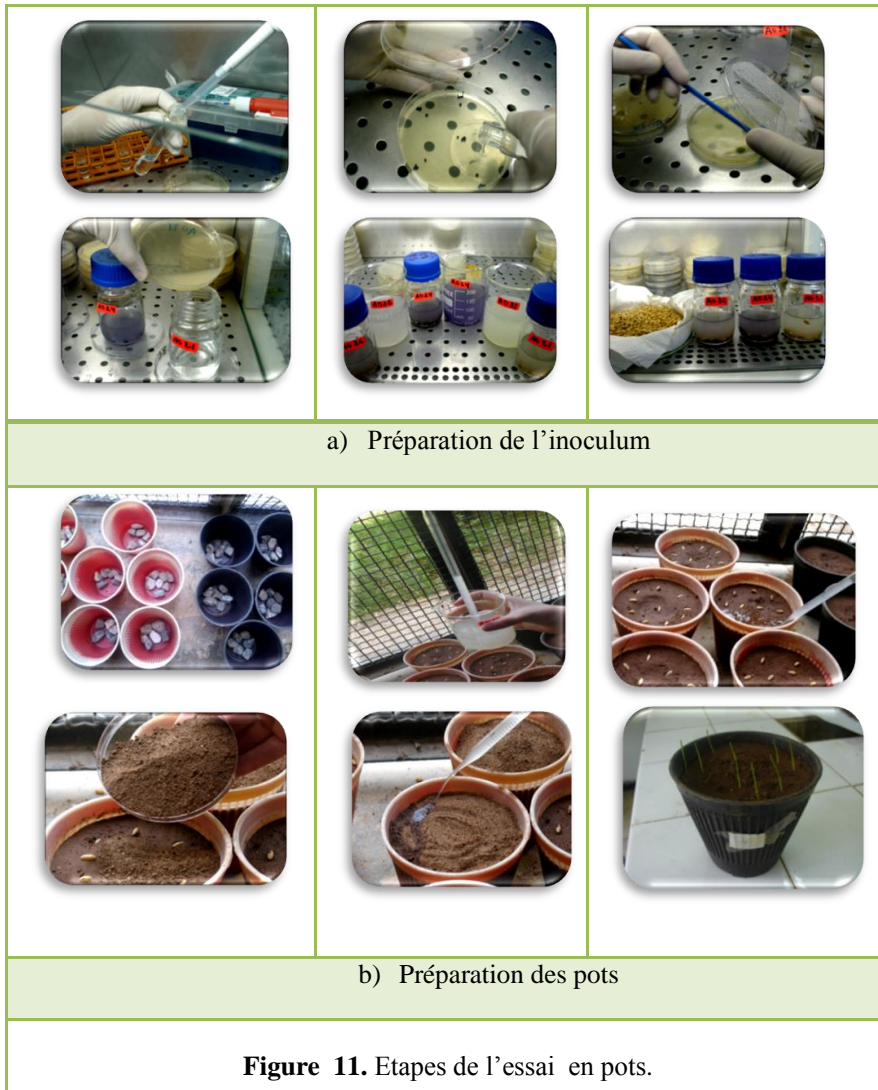
#### **3.5.1. Traitement des graines et semis**

Des graines de blé dur (variété *Massinissa*) désinfectées ont été semées dans des pots en plastique ( $\varnothing=12$  cm), remplis chacun d'une couche drainante à la base (gravier stérile) et de 500g d'un mélange sol/sable stérilisé (2:1, v/v) à raison de 10 graines/pot. La couche superficielle qui constitue un lit de semence a été au préalable humidifiée avec de l'eau stérile, puis recouverte par une couche de sol tamisé stérile destinée à recevoir l'inoculum. Cinq répétitions pour chaque traitement ont été réalisées (**Figure 11/b**).

Deux modes d'application de l'inoculum bactérien ont été retenus, le premier étant l'enrobage des semences, réalisé par trempage des graines de blé désinfectées dans 30 ml de suspension bactérienne de chacune des trois souches AO21, AO24 et AO26 sélectionnées pendant 10 minutes. Les suspensions bactériennes ont été préparées à partir de cultures de 48h incubées à 25°C sur Nutrient Agar comme indiqué ci-dessus (**Figure 11/a**).

Les graines chez le témoin correspondant ont été trempées dans 30 ml d'EDS pendant 10 minutes. Le second mode d'application consistait en une suspension bactérienne appliquée au sol. Dans ce cas, la couche de sol superficielle contenant les graines de blé semées a été irriguée avec 30 ml de suspension bactérienne de chacune des trois souches AO21, AO24 et AO26 sélectionnées. Le témoin correspondant a été irrigué avec la même quantité d'EDS.

Les pots ont été placés dans les conditions de laboratoire pendant une semaine afin de noter le taux d'émergence des plantules. Après la fin de l'émergence, 8 plants par pot ont été gardés et les pots ont été déposés à l'air libre en randomisation totale pendant 02 mois (mois de juillet et Août).



### 3.5.2. Arrosage et rappel bactérien

Les plants sont maintenus humides par arrosage quotidien avec de l'eau du robinet. Vingt huit jours après le semis, un rappel bactérien a été réalisé. Ainsi, chaque pot a été ré-inoculé par 10 ml de suspension bactérienne de chacune des trois souches testées. Le rappel s'est fait au niveau du sol et d'une manière à éviter tout contact direct de l'inoculum bactérien avec les feuilles ou les tiges.

### **3.5.3. Suivi de l'essai**

Durant l'expérimentation, un suivi quotidien de l'évolution de la croissance des plantules de blé a été fait à partir du 3<sup>ème</sup> jour après l'application de l'inoculum et pendant une période de 58 jours. La notation des paramètres a été réalisée pour chaque plant et a porté sur le taux d'émergence des plantules de blé variété Massinissa et l'évolution des différentes feuilles de rang 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 9.

A la fin de l'expérimentation, les plants ont été dépotés, mis dans des sacs en papier et séchés à l'air libre pendant 10 jrs, le poids sec de la partie aérienne et des racines a été noté.

## **4. Evaluation de l'activité antagoniste *in-vitro* des trois souches sélectionnées à l'égard de quelques champignons et bactéries phytopathogènes**

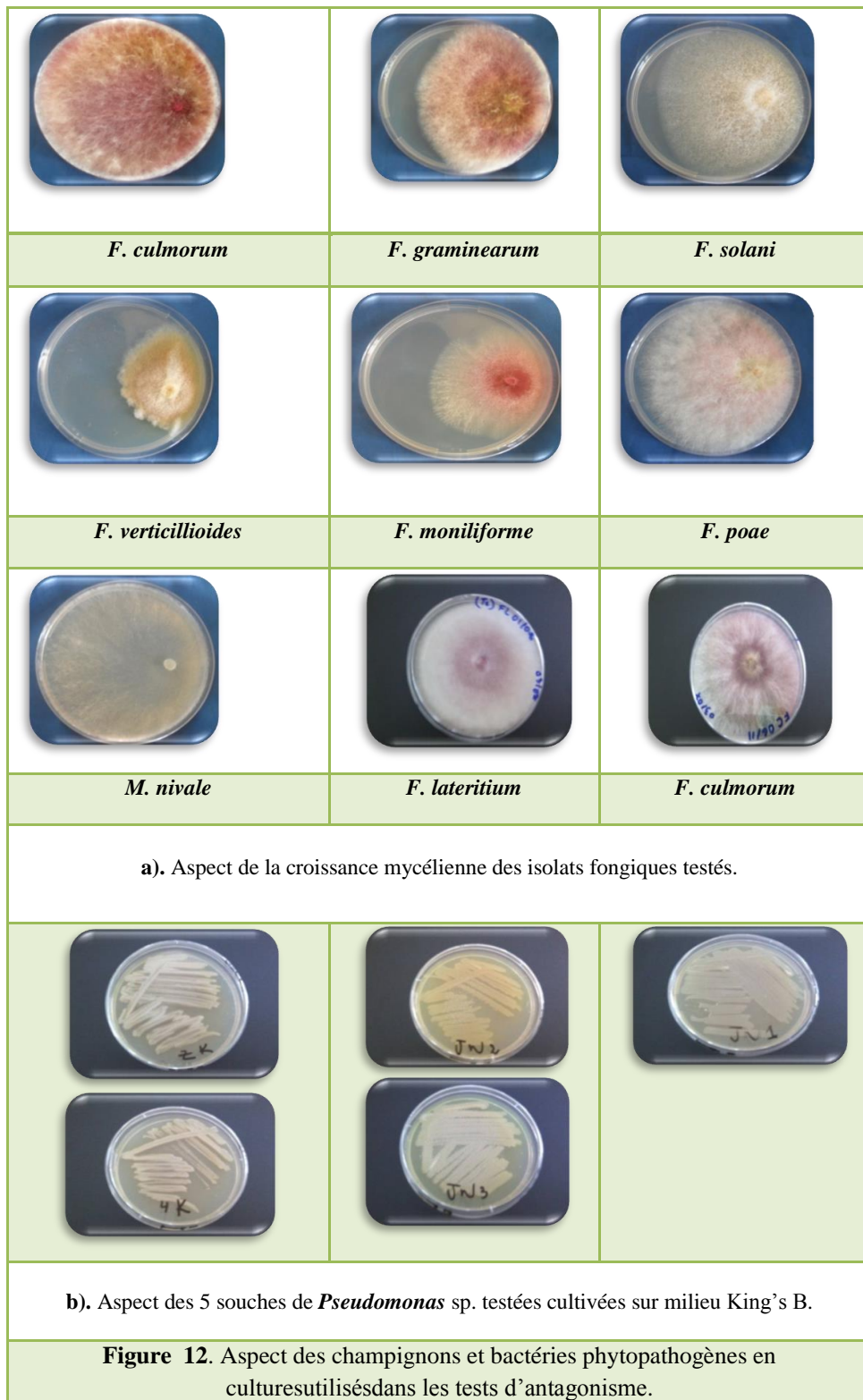
La détection d'éventuelles activités antifongique et antibactérienne a été effectuée chez les 3 souches codées AO21, AO24 et AO26. Le pouvoir antagoniste de ces souches a été testé *in-vitro*, d'une part : sur la croissance mycélienne de plusieurs isolats de champignons phytopathogènes, et d'autre part : sur la croissance de quelques souches de bactéries phytopathogènes. Le matériel fongique utilisé est constitué d'une collection de dix isolats de champignons isolés à partir des épis, du collet et des racines du blé présentant les symptômes typiques de la fusariose de l'épi ou de la pourriture racinaire. Ces isolats nous ont été fournis par Dr BOUREGHDA (laboratoire de mycologie, E.N.S.A). En ce qui concerne l'antagonisme bactérien, les cinq souches bactériennes testées ont été isolées de la semence de blé et appartiennent au genre *Pseudomonas*. Ces souches nous ont été fournies par M<sup>me</sup> DJEBARI (laboratoire de Phytobactériologie,ENSA). L'origine des microorganismes utilisés dans le test d'antagonisme est présentée dans le **tableau 4**.



**Tableau 4.** Origine des microorganismes utilisés dans les tests d'antagonisme

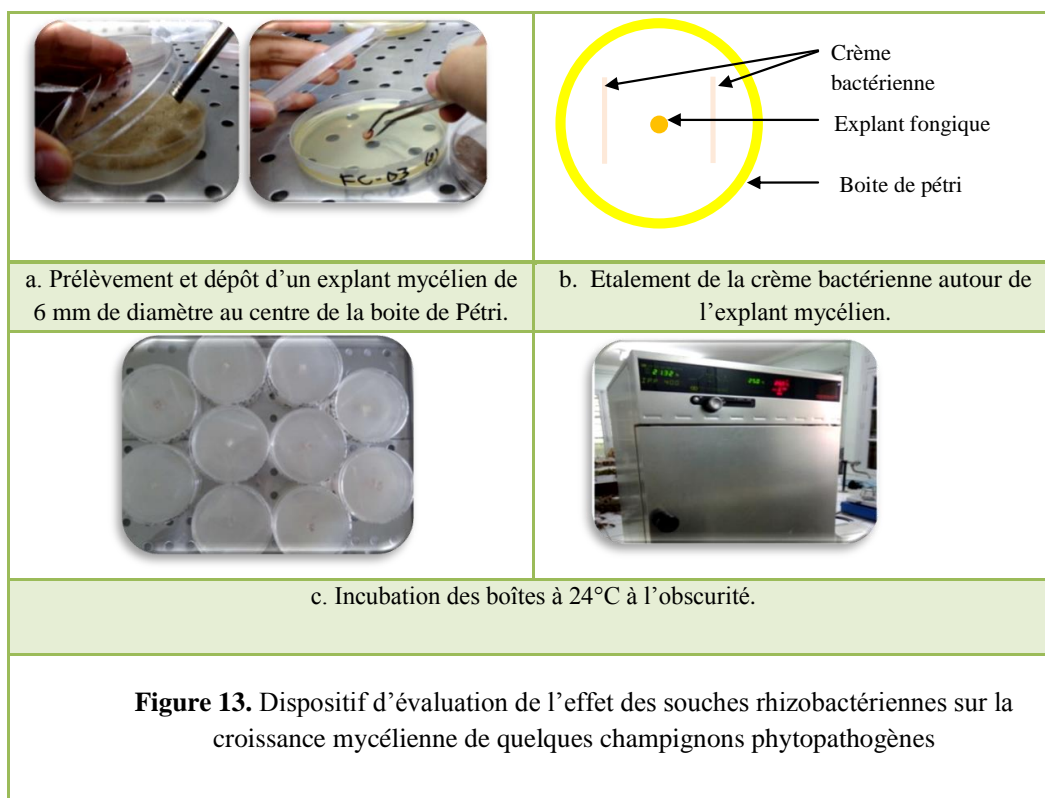
Espèces	Code	Origines	Culture	Variété	Organes de l'isolement
<i>Fusarium graminearum</i> Schwabe 1838	E1 FG.03.11	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	Collet
<i>Fusarium poae</i> (Peck) Wollenw. 1913	E2 FP.01.11	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	Epi
<i>Fusarium solani</i> (Mart.) Sacc. 1881	R11 FS.02.11	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	Racines
<i>Fusarium culmorum</i> (Wm.G. Sm.) Sacc. 1895	H5 FC.06.11	ITGC Oued Smar (Alger)	Blé dur	Vitron	Collet
<i>Fusarium verticillioides</i> (Sacc.) Nirenberg 1976	R9 FV.01.11	Sétif	Blé dur	-	Racines
<i>Fusarium moniliforme</i> J. Sheld. 1904	-	ENSA (Alger)	Blé dur	Vitron	Racines
<i>Fusarium culmorum</i> (Wm.G. Sm.) Sacc. 1895	R7 FC.15.11	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	racines
<i>Microdochium nivale</i> (Fr. : Fr.) Samuels & I.C. Hallett 1983	R1 MN.01.11	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	racines
<i>Fusarium lateritium</i> Nees, (1817)	FL.01.08	-	-	-	-
<i>Fusarium culmorum</i> (Wm.G. Sm.) Sacc. 1895	R13 FC.17.11	ENSA (Alger)	Blé dur	Vitron	Racines
<i>Pseudomonas</i> sp.	JN1	ENSA (Alger)	Blé		
	JN2		Blé		
	JN3		Blé		
	ZK		Blé		
	4K		Blé		

L'aspect morphologique de la croissance des microorganismes utilisés dans les tests d'antagonisme est représenté par la **figure 12**.



#### 4.1. Activité antifongique

Les tests d'antagonisme fongique ont été réalisés sur le milieu de culture solide (PDA). Les souches rhizobactériennes AO21, AO24 et AO26 ont été confrontées à une collection de dix isolats fongiques. Les souches bactériennes de 48h ont été étalées d'une manière à avoir deux stries parallèles distantes de 5 cm et un disque de 6 mm de diamètre prélevé d'une culture de chacun des isolats fongique d'au moins 5 jours est déposé au centre de la boîte de pétri. Ce dernier est placé suivant un axe équidistant des bactéries comme le montre la **figure 13**. Les boîtes ont été incubées pendant 1 semaine à 24°C. Après cette période, les observations ont porté sur l'existence ou l'absence d'une inhibition de la croissance mycélienne. Cette dernière a été estimée par la mesure du diamètre de la croissance mycélienne par comparaison aux boîtes témoins ne contenant que les isolats fongiques.

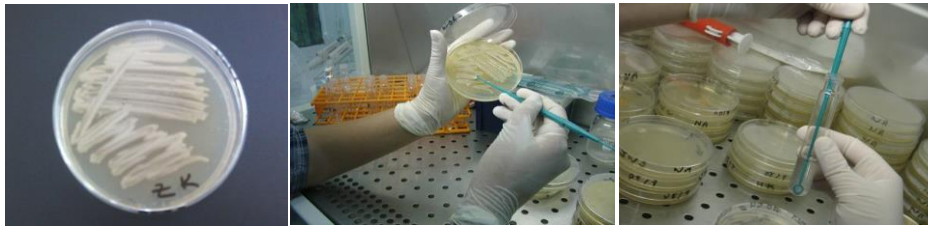


#### 4.2 Activité antibactérienne

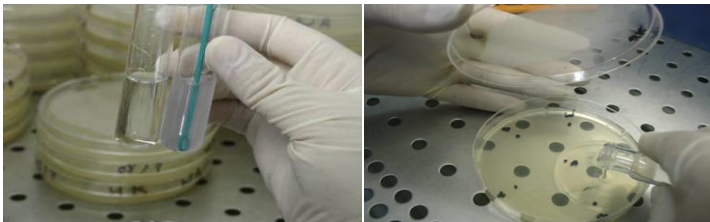
Le pouvoir antimicrobien des souches rhizbactériennes AO21, AO24 et AO26 à l'égard de quelques bactéries phytopathogènes du genre *Pseudomonasa* été déterminé. L'ensemble des souches bactériennes (les 5 bactéries phytopathogènes et les 3 bactéries antagonistes) ont été cultivées sur le milieu King's B pendant 48h à 28°C.

Dans des tubes à essai contenant 3ml d'eau gélosée à 0,6% et autoclavée, 500 µl de suspensions de chacune des souches bactériennes phytopathogènes ont été rajoutés et coulés dans des boîtes de pétri contenant une fine couche du milieu King's B préparé au préalable comme le montre la **figure 14 a et b**.

Parallèlement, des puits (Ø = 7mm) ont été pratiqués dans le milieu King's B à l'aide de cônes stériles et inoculés avec 10µl de suspension bactérienne antagoniste (AO21, AO24 et AO26) ou de l'EDS uniquement chez le témoin (**Figure 14 c**). Trois répétitions par souche bactérienne ont été réalisées. Après 48h d'incubation à 28°C à l'obscurité, l'activité antibactérienne se traduit par l'apparition de halos clairs autour des puits. Les diamètres des halos développés éventuellement sont mesurés.



a) Préparation des suspensions bactériennes des différentes souches.



b) Préparation du mélange (agar + suspension bactérienne) et coulage dans des boîtes de Pétri contenant le milieu King's B.



c) Inoculation des puits avec 10 $\mu$ l de chaque suspension bactérienne antagoniste (AO21, AO24 et AO26)

**Figure 14.** Test d'évaluation de l'activité antibactérienne.

## 5. Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel **STATISTICA Base (Méthodes Élémentaires d'Analyse Statistique ;** version 7.1, 2005). Tous les paramètres analysés ont fait l'objet d'une analyse de variance selon un dispositif expérimental uni ou bi-factoriel (ANOVA) et les différences entre les moyennes ont été comparées par le test de Newman-Keuls au seuil de 5%. Les paramètres de l'évolution de la croissance ont été analysés en randomisation totale avec cinq répétitions.

Les résultats obtenus sont présentés sous formes de graphes élaborés par le logiciel EXCEL et dans lesquels sont présentés les groupes homogènes sous forme de lettres.

## *Résultats et discussion*

## **1. Isolement et purification des rhizobactéries**

L'isolement des souches de la rhizosphère des plantules du blé dur (rhizoplan et sol rhizosphérique) nous a permis d'obtenir 26 souches dont 8 ont été isolées de la région de Bouira à partir de la variété Chen's, 10 souches de la région d'Elkhabouzia de la même variété et 8 souches sont originaires de la région de Ain El Aloui à partir de la variété Ouarsenis.

Après le 1<sup>er</sup> repiquage en vue de la purification des souches bactériennes, seulement 22 souches ont pu être cultivées sur le milieu Nutrient Agar, le reste qui représente 15% de la totalité n'a pas pu être cultivé.

## **2. Sélection des souches stimulatrices de la croissance végétale**

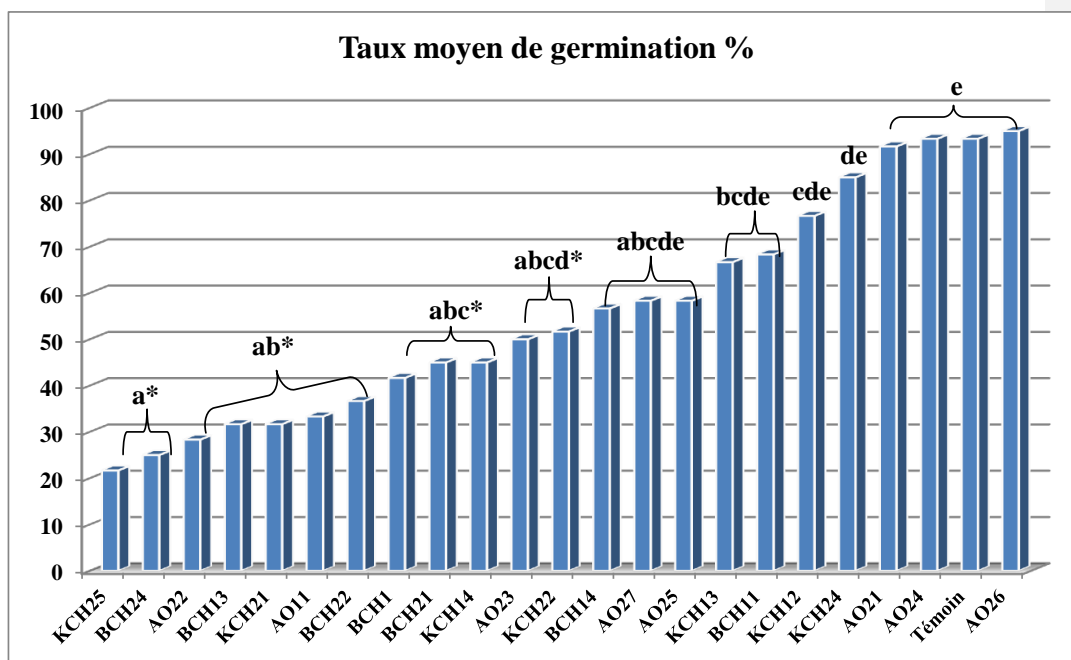
### **2.1 Effet de 22 souches rhizobactériennes sur la germination de la variété de blé dur « Chen's »**

Le premier essai consistait en un test préliminaire indicateur du potentiel stimulateur ou inhibiteur des 22 souches isolées sur la germination des graines du blé et la croissance de leurs coléoptiles.

#### **2.1.1 Effet sur le taux de germination des graines de blé**

L'analyse de la variance à un facteur a révélé un effet très hautement significatif du traitement avec les souches rhizobactériennes sur le taux de germination des graines (Tableau 1, **Annexe II**).

Les souches AO26, AO24 et AO21 ont entraîné les taux de germination les plus élevés (95%, 93% et 92%, respectivement), mais qui n'étaient pas statistiquement différentes de ceux du témoin non inoculé. Seules les souches rhizobactériennes qui ont entraîné les valeurs les plus faibles (12 souches) étaient statistiquement différentes du témoin, indiquant un effet négatif sur la germination des graines de blé (**Figure 15**). Le taux le plus faible a été observé avec la souche codée KCH25 avec un taux de germination de 22%.



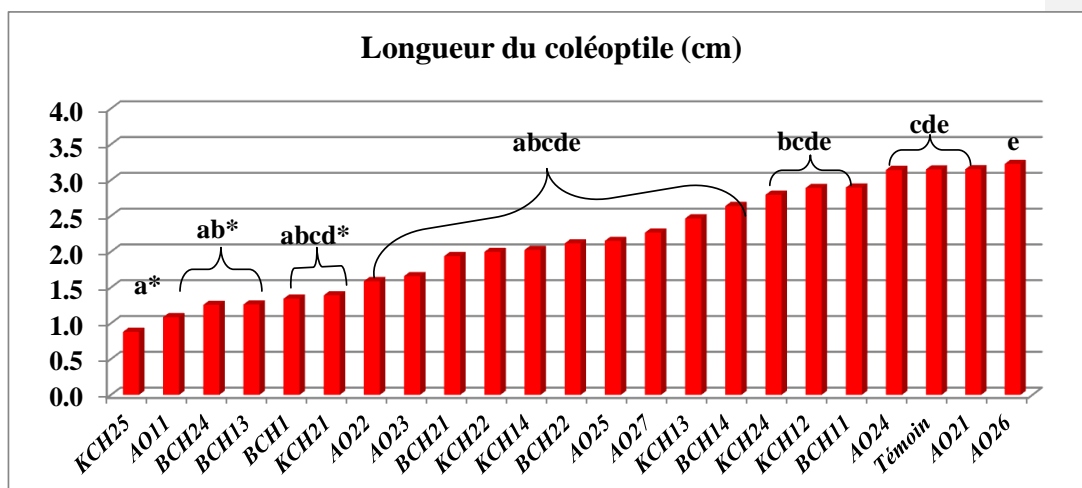
**Figure 15.** Effet des 22 souches rhizobactériennes isolées sur la germination des graines de la variété Chen's de blé dur.

\* Statistiquement différent du témoin non inoculé.

### 2.1.2 Effet sur la longueur du coléoptile

L'analyse statistique réalisée sur les données correspondant à la dernière date de mesure des longueurs des coléoptiles a permis de mettre en évidence des différences significatives entre les différentes souches rhizobactériennes par rapport au témoin (**Tableau 2, Annexe II**). Pour ce paramètre nous avons remarqué que les souches ayant montrées les taux de germination les plus importants ont gardé le même comportement avec la longueur du coléoptile, où nous avons noté une légère stimulation non significative par la souche AO26 avec 3,3 cm, suivie de près par la souche AO21 (3,2 cm) et la souche AO24 (3,1 cm) comparativement au témoin qui a donné une valeur de 3,2 cm. Le reste des souches rhizobactériennes ont donné des valeurs plus faibles indiquant un effet négatif sur la croissance du coléoptile des graines germées. La longueur la plus faible du coléoptile a été notée avec la souche KCH25 avec une valeur de 0,9 cm (**Figure 16**).





**Figure 16.** Effet des 22 souches rhizobactériennes isolées sur la longueur du coléoptile de la variété Chen's de blé dur.

\* Statistiquement différent du témoin non inoculé.

Les analyses statistiques de comparaison des moyennes effectuées sur le taux de germination des graines et la longueur du coléoptile ont révélé différents groupes homogènes (**Figures 15 et 16**). Pour le paramètre taux de germination, nous notons que les souches AO26, AO24 et AO21 font partie du même groupe homogène "e" avec les valeurs les plus élevées, tandis que pour la longueur du coléoptile, la souche AO26 forme un groupe à part "e" avec la meilleure moyenne suivie de près par les souches AO21 et AO24 qui forment le groupe "cde".

Les analyses statistiques ont permis de classer les 22 souches testées selon leur activité en deux groupes principaux: l'un est composé des souches ayant montré une légère stimulation, il s'agit des souches AO26, AO24 et AO21. Ces dernières présentent des pourcentages moyens de l'augmentation de la longueur du coléoptile et du taux de germination variant de 0,1 à 2,4% et de 0,02 à 1,7%, respectivement. Le deuxième groupe est composé des souches ayant entraîné des pourcentages moyens de réduction allant de 8 à 72% de la croissance du coléoptile et de 9 à 76% du taux de germination. Pour ces raisons, nous avons choisi d'approfondir notre expérimentation sur ces 3 souches rhizobactériennes.

## **2.2 Effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la germination de cinq variétés de blé dur**

Les trois souches rhizobactériennes codées AO21, AO24 et AO26 les plus performantes ont été évaluées pour leur capacité stimulatrice de la croissance de cinq variétés de blé dur. La fiche descriptive des cinq variétés utilisées est portée en **Annexe III**.

### **2.2.1 Effet sur le taux de germination des cinq variétés de blé**

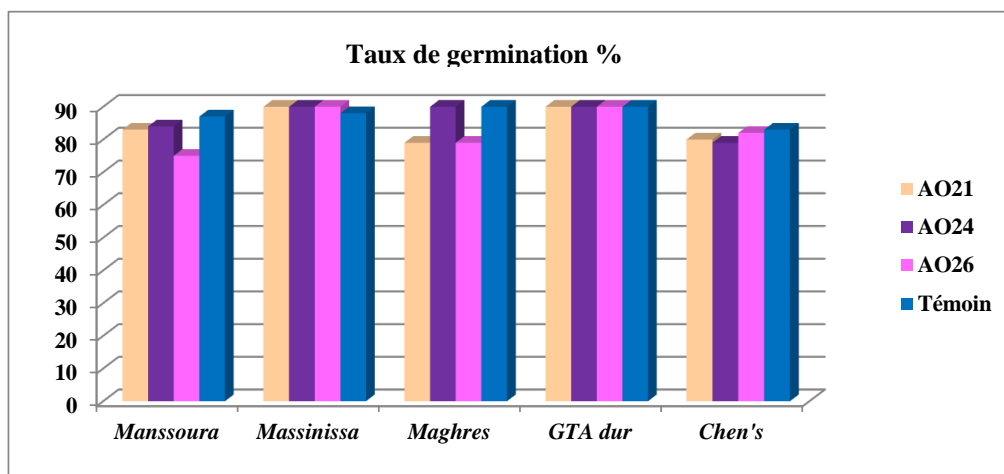
Le traitement statistique des valeurs correspondant au taux de germination des différentes variétés de blé dur inoculées par les trois souches rhizobactériennes montre que les taux de germination des graines des 5 variétés de blé bactérisées ne présentent aucune différence statistiquement significative du témoin non inoculé bien que l'effet variétal était très hautement significatif ( $p < 0,000038$  : **Tableau 3, Annexe II**).

Le traitement de la variété Massinissa par les trois souches rhizobactériennes AO24, AO26 et AO21 a entraîné une amélioration de la germination avec des taux de l'ordre de 95%, 92% et 91%, respectivement par rapport au témoin non inoculé ayant donné un taux de 88% (**Figure 17**). De même, la variété GTA dur a connu une amélioration, avec des taux de germination de l'ordre de 98% suite à l'inoculation par la souche AO26 et 97% par les souches AO24 et AO21, par rapport au témoin ayant donné 96%.

La variété Maghres a donné le taux de germination le plus élevé avec la souche AO24 avec une moyenne de 97%, tandis que les souches AO26 et AO21 ont porté ce taux à 79%. Chez le témoin, une moyenne de 93% a été notée.

Le traitement de la variété Manssoura par les trois souches rhizobactériennes AO24, AO21 et AO26 a entraîné une baisse dans les valeurs du taux de germination des graines pour atteindre 84%, 83% et 75%, respectivement par rapport au témoin non inoculé chez lequel la meilleure valeur de 87% a été notée.

La variété Chen's G3 non inoculée a enregistré un taux de germination de 82% suivie de près par les lots traités par les souches AO26, AO24 et AO21 avec des taux respectifs d'environ 81%, 80% et 73%.



**Figure 17.** Effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur le taux de germination de cinq variétés de blé dur cultivées en Algérie.

### 2.2.2 Effet sur la longueur du coléoptile

L'analyse statistique réalisée sur les données correspondant à la dernière date de mesure des longueurs du coléoptile a permis de mettre en évidence un effet variétal hautement significatif ( $p < 0,000000$  : **Tableau 4** en **Annexe II**).

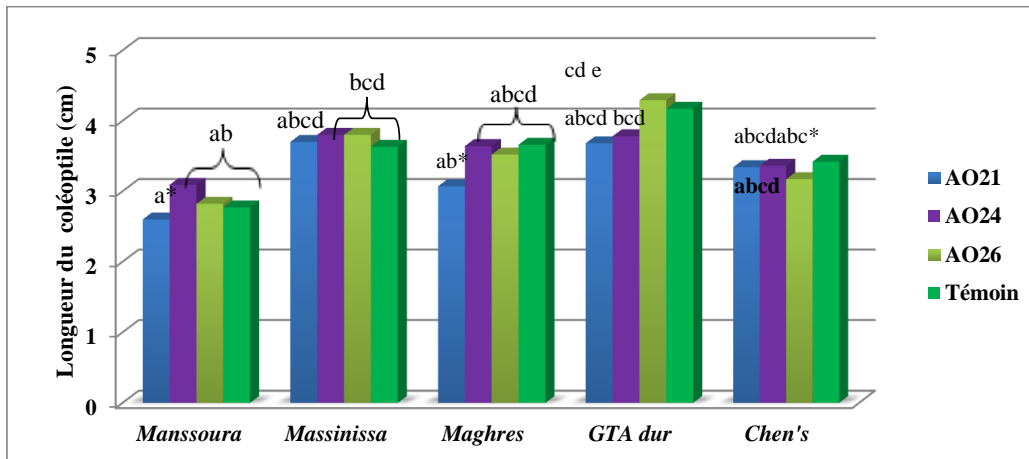
La variété Massinissa traitée avec toutes les souches bactériennes a montré une croissance positive du coléoptile. Néanmoins, ce sont les deux souches AO26 et AO24 qui ont causé les croissances les plus élevées avec 3,8 cm mais qui ne sont pas statistiquement différentes du témoin non traité ayant une moyenne de 3,6 cm (**Figure 18**).

La variété GTA dur a connu une amélioration de la longueur du coléoptile suite au traitement par la souche AO26 avec une valeur de 4,3 cm, mais qui n'est pas statistiquement différente du témoin non traité.

Avec la variété Manssoura, nous avons noté une augmentation de la longueur du coléoptile avec des valeurs moyennes de l'ordre de 3,1 cm et 2,8 cm suite au traitement avec les souches AO24 et AO26, respectivement mais qui ne sont pas statistiquement différentes du témoin non traité. D'autre part, une réduction significative de la longueur du coléoptile par la souche AO21 avec une valeur de 2,6 cm a été marquée.

En revanche, aucune souche n'a montré un effet positif sur la longueur du coléoptile avec les variétés Maghres et Chen's G3. Les trois souches ont provoqué une légère réduction non significative par rapport au témoin non inoculé.

Vu les résultats obtenus, nous avons choisis de poursuivre l'expérimentation avec la variété Massinissa qui a montré une légère amélioration des deux paramètres étudiés suite au traitement avec les trois souches rhizobactériennes.



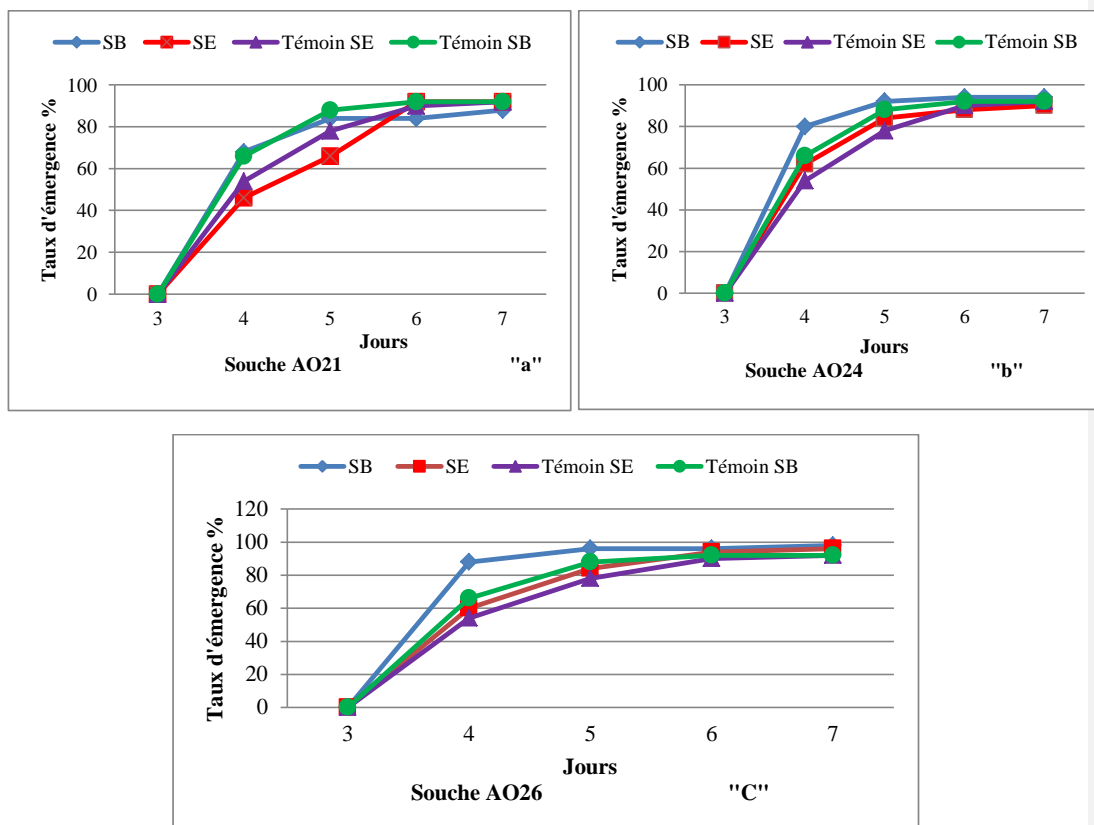
**Figure 18.** Effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la longueur du coléoptile de cinq variétés de blé dur\* Statistiquement différent du témoin non inoculé.

### 3. Effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la croissance de blé dur variété Massinissa cultivée en pots

#### 4.

##### 3.1. Effet sur l'émergence des plantules de blé

L'analyse de la variance relative à l'effet des trois souches rhizobactériennes sur le taux d'émergence des plantules de blé ne montre aucun effet significatif sur le taux d'émergence des plantules de blé comparativement au témoin (Tableau 5, Annexe II). La figure 19 représente les résultats de l'évolution dans le temps du taux d'émergence des plantules de blé sous l'effet des 3 souches rhizobactériennes appliquées sous forme de suspension bactérienne ou d'enrobage de semences.



**Figure 19.** Evolution dans le temps du taux d'émergence des plantules de blé variété Massinissa sous l'effet des 3 souches rhizobactériennes appliquées sous forme de suspension bactérienne ou d'enrobage des semences.

Témoin SE : témoin semences enrobées. Témoin SB : témoin suspension bactérienne

L'effet de la souche rhizobactérienne AO21 est illustré par la **figure 19/a** à partir de laquelle nous remarquons que cette souche n'a provoqué aucune amélioration des valeurs du taux d'émergence quelque soit le mode d'application. De surcroît, chez les traitements 'témoin SB' et 'témoin SE', les meilleurs valeurs du taux d'émergence des plantules ont été notées durant toute la période de notation de ce paramètre qui s'étend du 3<sup>ème</sup> au 7<sup>ème</sup> jour après le semis.

L'effet de la souche AO24 est illustré par la **figure 19/b**. Avec cette souche, les graines de blé ont commencé à germer dès le troisième jour comme chez les autres souches, mais cette fois durant le 4<sup>ème</sup> jour un taux de 80% en mode suspension bactérienne a été noté. Par contre, ce taux n'a pu être atteint par le témoin correspondant qu'après 24h. L'augmentation du taux d'émergence était poursuivie par le traitement en mode de semences enrobées pendant le 5<sup>ème</sup>

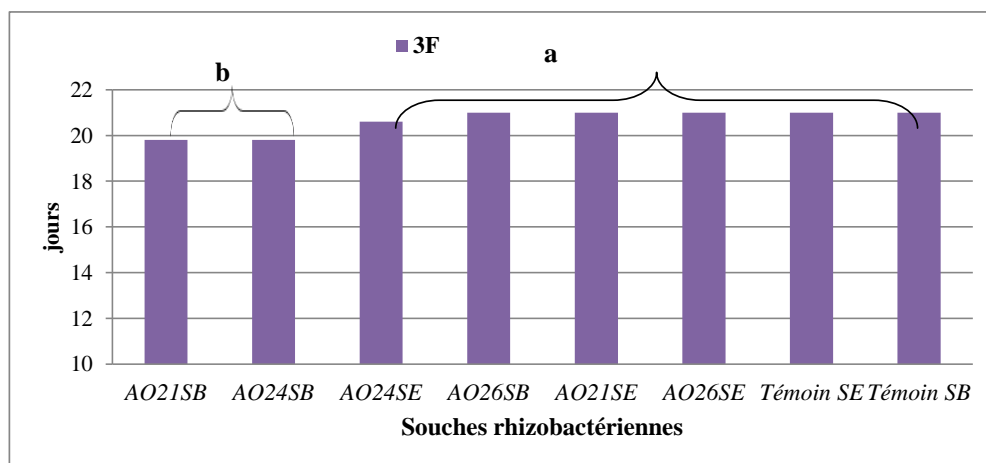
jour où il a pu atteindre un taux de 84% devant un taux de 78% enregistré chez le témoin correspondant.

L'effet de la souche AO26 est illustré par la **figure 19/c**. Nous remarquons que quelque soit le mode d'application, la souche AO26 a accéléré l'émergence des graines de blé comparativement aux témoins correspondants. Cette dernière, appliquée sous forme de suspension bactérienne, a induit un taux d'émergence de 98% suivi de près par l'enrobage des semences avec un taux de 96% comparativement aux témoins correspondants chez lesquels un taux similaire de 92% a été noté. Par contre, avec les deux autres souches, leurs témoins y compris, le taux maximal de 92% a été obtenu.

### 3.2. Effet sur les différents stades de développement des plantules de blé

#### 3.2.1 Stade trois feuilles

L'analyse de la variance relative au stade 3 feuilles (le stade 13 selon l'échelle de **Zadoks**, **Annexe IV**) des plantules de blé, montre l'existence d'un effet souche et mode d'application significatif (**Tableau 6**, **Annexe II**). Il est noté aussi que la comparaison des moyennes effectuée sur ce paramètre a révélé deux groupes homogènes (**Figure 20**).



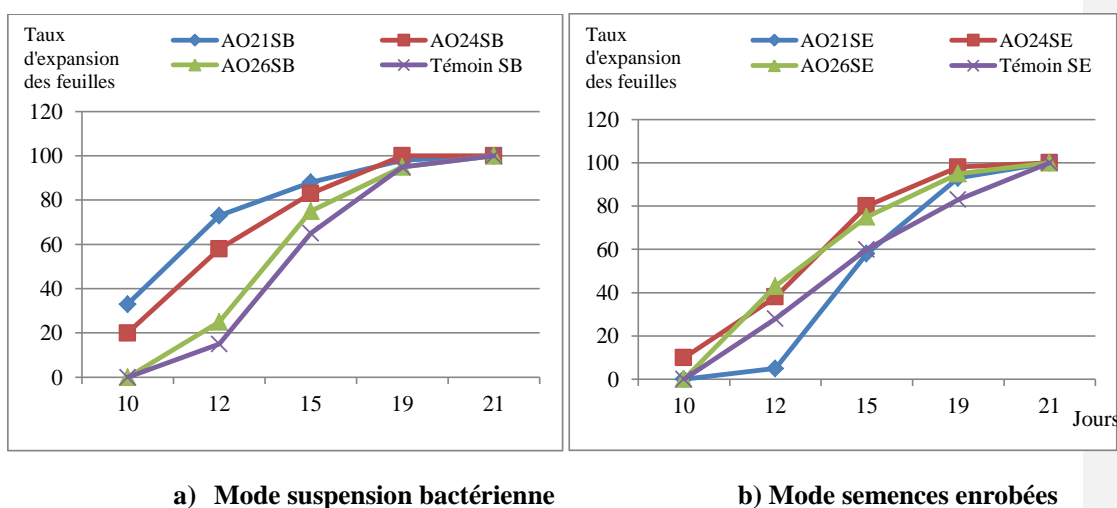
**Figure 20:** Croissance de la plante après 3 semaines de culture sous l'effet des 3 souches rhizobactériennes appliquées sous forme de suspension bactérienne ou de semences enrobées.

D'après la **figure 21** qui montre l'évolution dans le temps de l'expansion de la feuille du rang 3 sous l'effet des trois souches rhizobactériennes, nous remarquons une allure

généralement homogène pour l'ensemble des souches. Le stade 3 feuilles a été atteint pour les souches AO21 et AO24 en mode suspension bactérienne dans 20 jours alors que pour les autres traitements cette phase s'est étalée sur 21 jours.

Les résultats relatifs au taux d'expansion des feuilles de rang 3 sous l'effet des trois souches sont représentés par la **figure 21 a et b**. Il est à remarquer que la croissance de cette feuille depuis son émergence jusqu'à son expansion totale s'étend du 10<sup>ème</sup> au 21<sup>ème</sup> jour.

Appliquées sous forme de suspensions bactériennes, les souches AO21 et AO24 ont dès le 10<sup>ème</sup> jour provoqué des taux de 33 et 20% de plantules ayant la troisième feuille, respectivement. Au bout du 15<sup>ème</sup> jour, les différentes souches ont provoqué les meilleurs taux avec une moyenne de 82%. Par contre, avec l'enrobage de la semence 71% ont été obtenus devant 65 et 60% chez les témoins correspondants. Au 19<sup>ème</sup> jour, seulement le traitement AO24 SB a atteint 100% de plantules ayant 3 feuilles, les autres traitements n'ont pu atteindre ce stade que 48h après (**Figure 21 a et b**).



**Figure 21:** Évolution du taux d'expansion de la feuille de rang 3 des plantules de blé variété Massinissa, après 3 semaines de culture sous l'effet des 3 souches rhizobactériennes appliquées sous forme de suspensions bactériennes ou de semences enrobées.

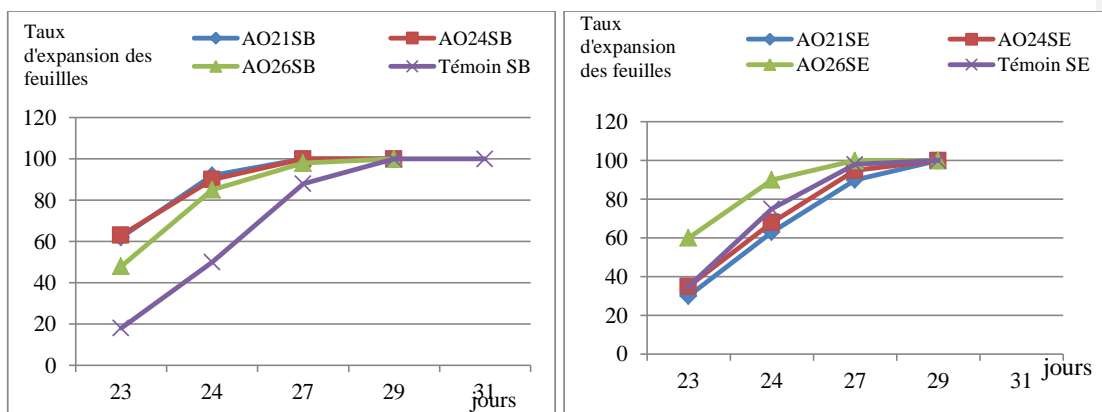
Témoin SE : témoin semences enrobées. Témoin SB : témoin suspension bactérienne

### 3.2.2 Stade quatre feuilles

L'analyse de la variance relative au stade 4 feuilles des plantules de blé montre, d'une part l'existence d'un effet modes d'application très hautement significatif et d'autre part, révèle un effet interaction (mode d'application x souches) hautement significatif (**Tableau 7, Annexe II**).

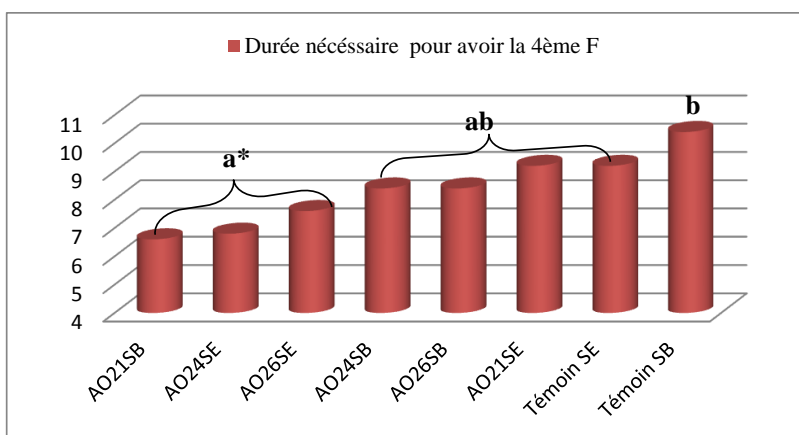
D'après les résultats illustrés par la **figure 22**, nous constatons généralement que quelque soit le mode d'application, les souches testées ont causé un gain dans le temps nécessaire pour l'émission de la 4<sup>ème</sup> feuille qui s'étend entre 1 et 5 jours (**Figure 22 c**), ainsi que pour le taux d'expansion de la feuille de rang 4 (**Figures 22 a et b**).

La souche AO21 appliquée sous forme de suspension bactérienne ainsi que les souches AO24 et AO26 appliquées sous forme de semences enrobées ont provoqué les meilleurs taux d'expansion des feuilles de rang 4 dès le 23<sup>ème</sup> jour avec 63 et 62%, respectivement. La même tendance a été observée durant toute la période de notation de ce paramètre. Les traitements témoins non inoculés sont caractérisés par les taux les plus faibles avec les durées nécessaires au développement de la 4<sup>ème</sup> feuille les plus longues.



a) Mode suspension bactérienne

b) Mode semences enrobées





**Figure 22** : Croissance de plantules de blé variété Massinissa après 4 semaines de culture en pots sous l'effet des 3 souches rhizobactériennes appliquées sous forme de suspensions bactériennes ou de semences enrobées. Évolution du taux d'expansion de la feuille de rang 4.

Témoin SE : témoin semences enrobées. Témoin SB : témoin suspension bactérienne

A ce stade nous avons remarqué que les plantules développées sur les témoins non inoculés se caractérisent par des plants qui présentent une faible vigueur comparativement aux plants traités bien qu'elles soient sujettes aux mêmes conditions du milieu. On note aussi que la phase de tallage commence par le stade 4 feuilles et se termine à la montaison.

### 3.2.3 Stade cinq feuilles

Comme les paramètres précédents, un suivi de l'évolution des différents stades de développements des plantules de blé a été fait mais cette fois ci nous rappelons que nous avons fait un 2<sup>ème</sup> apport bactérien sur les plants traités par les souches AO26, AO24 et AO21. Chaque pot a été arrosé avec 10 ml de suspension bactérienne correspondante.

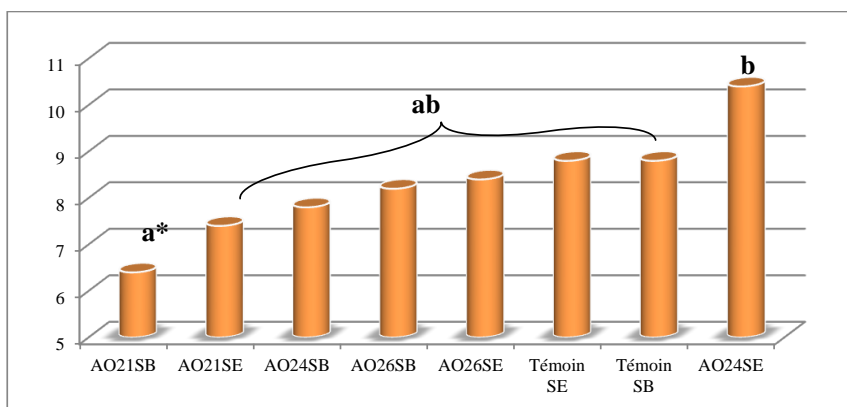
Les résultats de l'analyse statistique de l'effet des 3 souches rhizobactériennes appliquées sous forme de suspension bactérienne ou enrobage des semences ont montré un effet très hautement significatif sur l'expansion de la 5<sup>ème</sup> feuille, par comparaison aux deux témoins. Ajoutons à cela un effet interaction hautement significatif (**Tableau 8, Annexe II**).

Les résultats relatifs au taux d'expansion des feuilles de rang 5 sous l'effet des trois souches sont représentées par la **figure 23 a et b**. Une apparence généralement hétérogène pour l'ensemble des souches est remarquée.

Il est à remarquer que la durée nécessaire pour l'émission de la feuille depuis son émergence jusqu'à son expansion totale s'étend du 29<sup>ème</sup> au 34<sup>ème</sup> jour. La souche AO21 appliquée sous



forme de suspension bactérienne ou enrobage de semences a nécessité une durée de 6 à 7 jours avec un taux d'expansion de 95 et 63%, respectivement au 32<sup>ème</sup> jour. Durant cette même date, la souche AO24 appliquée sous forme de suspension bactérienne a entraîné un taux de 100 % avec une durée de 8 jours (**Figure 23 c**) alors qu'en mode enrobage de semences cette dernière a causé un taux de 55% pour une durée de 10 jours. Les traitements témoins n'ont accompli le maximum du taux d'expansion de la feuille du rang 5 qu'au bout du 35<sup>ème</sup> jour.



c) Durée nécessaire pour l'expansion de la 5<sup>ème</sup> feuille (jours)

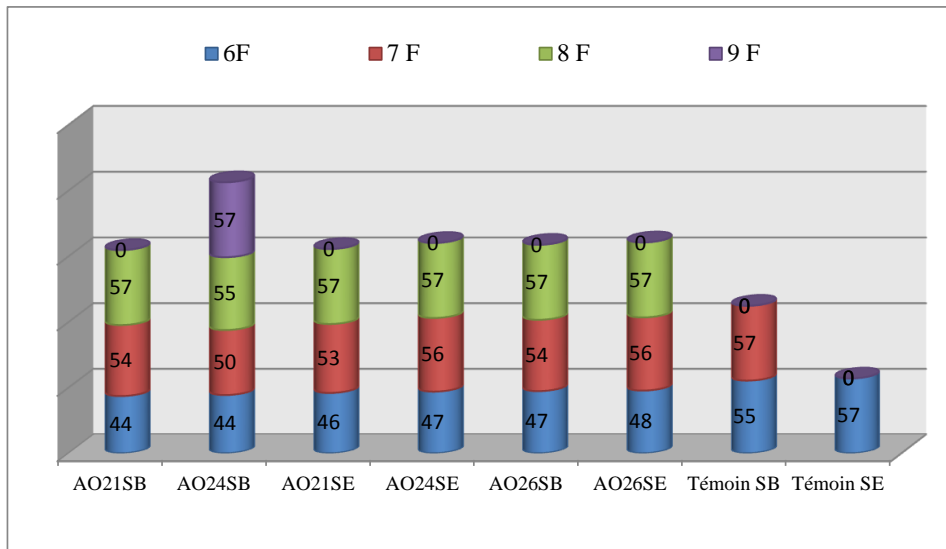
**Figure 23:** Croissance des plantules de blé variété Massinissa après 5 semaines de culture en pots sous l'effet des 3 souches rhizobactériennes, appliquées sous forme de suspension bactérienne ou de semences enrobées. Évolution du taux d'expansion de la feuille de rang 5.

Témoin SE : témoin semences enrobées. Témoin SB : témoin suspension bactérienne

### 3.2.4 Stades 6, 7, 8 et 9 feuilles

D'après la **figure 24** qui illustre l'effet des trois souches rhizobactériennes apportées selon deux modes d'application sur le taux d'expansion des feuilles de rang 6, 7,8 et 9 ; l'allure du graphe suggère un effet positif du traitement par ces bactéries sur les différents stades de développement des plantules de blé.

S'agissant du stade 6 feuilles, les analyses statistiques mettent en évidence un effet souche très hautement significatif ( $P < 0,000$ ). Ainsi, les trois rhizobactéries ont entraîné des différences nettement significatives par rapport aux témoins non inoculés. La comparaison des moyennes effectuée sur ce paramètre permet de distinguer 4 groupes homogènes dont 4 groupes chevauchant (**Tableau 9, Annexe II**). Il est à remarquer que la croissance de cette feuille depuis son émergence jusqu'à son expansion totale s'étend sur une période de 1 à 19 jours. Cependant, nous notons que les souches AO21 et AO24 appliquées sous forme de suspension bactérienne ont entraîné une certaine vitesse de la croissance se traduisant au cours du temps en précocité au tallage puisque cet étage foliaire coïncide avec la phase début de tallage. À partir du stade 7 feuilles, nous constatons que seul le traitement témoin n'a pu atteindre ce stade. S'agissant du stade 8 feuilles, ce dernier a été accompli par le traitement suspension bactérienne de la souche AO24 dans une durée de 55 jours depuis le semis, alors qu'avec les autres traitements ce stade a pris 57 jours. Tandis qu'avec les traitements comportant les témoins correspondants avec les deux modes d'application, on observe un palier de croissance nulle ou même de régression apparente, probablement due au jaunissement et au dessèchement des feuilles.

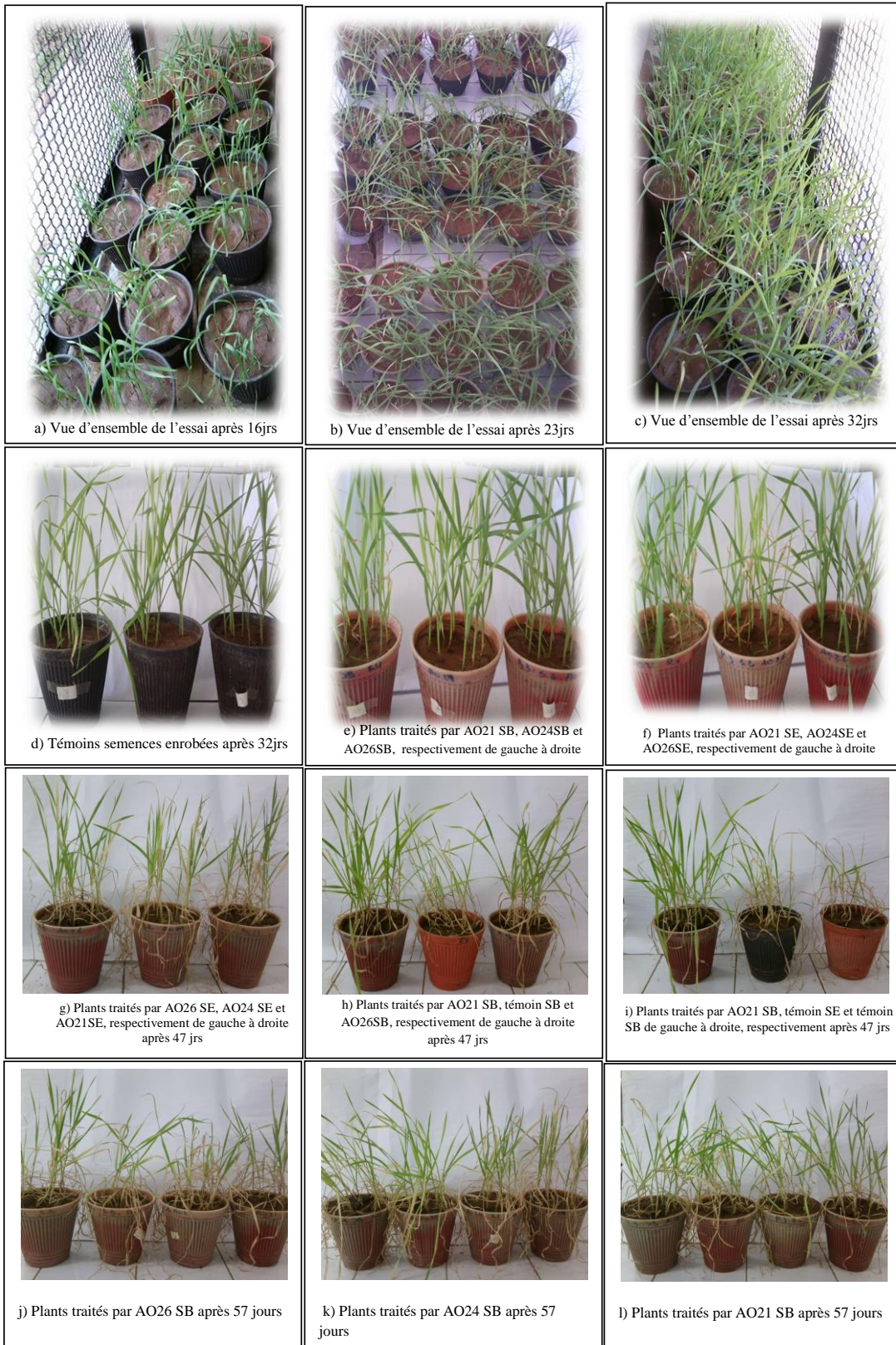


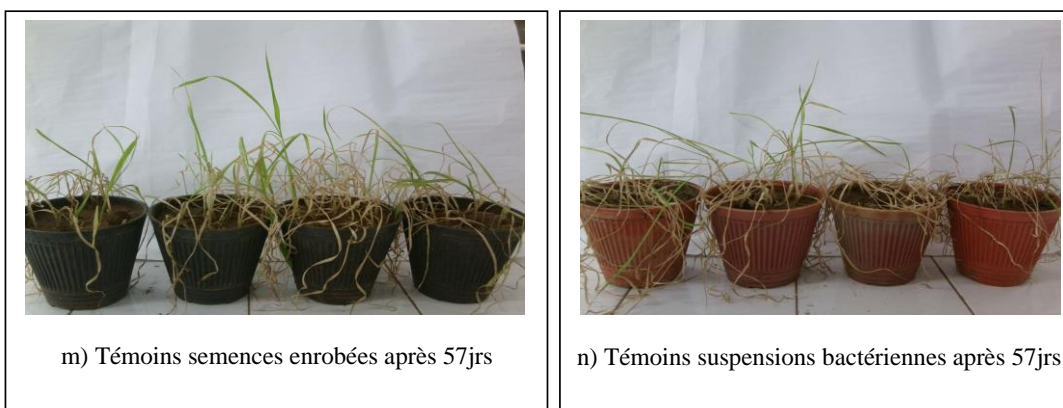
**Figure 24 :** Effet des trois souches rhizobactériennes appliquées sous forme de suspension bactérienne ou de semences enrobées sur l'expansion des feuilles de rangs 6, 7, 8 et 9 des plantules de blé variété Massinissa.

Témoin SE : témoin semences enrobées. Témoin SB : témoin suspension bactérienne

Durant la période d'évolution des différents étages foliaires des plantules de blé, nous avons remarqué que les feuilles de la base se flétrissent et brunissent, suivi d'unjaunissement et dessèchement de l'extrémité des feuilles puis ce symptôme s'est généralisé sur les feuilles supérieures jusqu'à leur dessèchement total. Ces symptômes sont apparus beaucoup plus sur les témoins puis ils se sont propagés vers les autres traitements (**Figure 25**). À ce stade nous avons arrêté l'expérimentation.

## Résultats et Discussion





**Figure 25 :** Test en pots de l'évaluation de l'effet des trois souches rhizobactériennes appliquées sous forme de suspension bactérienne ou de semences enrobées sur la croissance de blé variété Massinissa

#### 4. Effet sur le poids de la matière sèche des différentes parties de la plante

##### 4.1 Effet sur le poids sec des racines des plantules de blé variété Massinissa

Les analyses statistiques effectuées sur les valeurs moyennes des pesées des biomasses des parties racinaires sont présentés dans le **Tableau 10, Annexe II**.

D'après le **tableau 5** nous remarquons que quelque soit le mode d'application, la souche AO26 a entraîné le meilleur poids sec des racines avec 550 mg, tandis qu'avec les traitements comportant les témoins correspondants avec les deux modes d'application, on observe les poids sec les plus faibles (420 mg pour les témoins suspension bactériennes et 390 mg pour les témoins semences enrobées).

**Tableau 5.** Poids sec des racines des plantules de blé variété Massinissa suite à l'inoculation par les trois souches rhizobactériennes.

Traitement	Poids sec des racines (mg) non significatif		
	AO26	AO24	AO21
Témoin suspension	420	420	420
Témoin enrobage	390	390	390
Suspension bactérienne	550	510	480
Enrobage des semences	550	400	480

Les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes selon le test de Newman -Keuls au seuil de 5%.

#### 4.2 Effet sur le poids sec des feuilles des plantules de blé variété Massinissa

L'analyse de la variance relative au poids sec moyen de la partie aérienne montre qu'il existe une différence hautement significative ( $p = 0,002$ ) entre les différentes souches et les témoins. Cependant, une différence non significative est notée concernant l'effet mode d'inoculation (**Tableau 11, Annexe II**). D'après le **tableau 6**, les poids secs de la partie aérienne les plus importants sont obtenus avec les traitements ayant subi une inoculation sous forme de suspension bactérienne suivis par ceux obtenus par l'enrobage des semences, et dont les plantules présentent un bon développement végétatif (meilleure longueur des tiges et un nombre de feuilles important). C'est le cas des traitements AO21, AO26 et AO24, respectivement mais qui ne sont pas statistiquement différentes des témoins correspondants.

**Tableau 6.** Poids sec des feuilles des plantules de blé dur variété Massinissa suite à l'inoculation par les trois souches rhizobactériennes.

Traitements	Poids sec des feuilles (mg) non significatif		
	AO26	AO24	AO21
Témoin suspension	640	640	640
Témoin enrobage	610	610	610
Suspension bactérienne	930	850	930
Enrobage de semence	870	710	760

Les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes selon le test de Newman-Keuls au seuil de 5%.

#### 4.3 Effet sur le poids sec des plantules entières de blé variété Massinissa

L'analyse statistique des résultats montre un effet souche et mode d'inoculation significatif sur le poids sec des plantules entières de blé comparativement aux témoins (**Tableau 12, Annexe II**).

L'examen des résultats présentés dans le **tableau 7** montre que les trois souches testées appliquées sous forme de suspensions bactériennes stimulent significativement le poids sec des plantules avec un taux variant de 28 à 40%. Par contre, seule la souche AO26, appliquée sous forme d'enrobage de semences, a entraîné une augmentation du poids significative de l'ordre de 42%.

**Tableau 7.** Poids sec des plantules entières de blé variété Massinissa suite à l'inoculation par les trois souches rhizobactériennes.

Traitements	Poids sec des plantules entières de blé (mg)		
	AO26	AO24	AO21
Témoin suspension	1060 abc	1060 abc	1060 abc
Témoin enrobage	1000 c	1000 c	1000 c
Suspension bactérienne	1480 b* (40)	1360 ab* (28)	1410 ab* (33)
Enrobage de semence	1420 ab* (42)	1110 abc (11)	1240 abc (24)

Les moyennes suivies de différentes lettres sont statistiquement différentes selon le test de Newman -Keuls au seuil de 5%. \* : différence statistiquement significative. Les valeurs entre parenthèses représentent la différence avec le témoin correspondant en %.

### 5. Effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes sélectionnées à l'égard de dix champignons phytopathogènes

Les résultats du test de la confrontation directe sont reportés dans le **tableau 8**.

**Tableau 8.** Diamètre moyen de la croissance mycélienne des champignons phytopathogènes testés sous l'effet des trois souches rhizobactériennes.

Isolat / Traitement	Diamètre de la croissance mycélienne (cm)			
	Témoin	AO26	AO24	AO21
<i>Fusarium solani</i>	6,9 d	3,5 a*	5,7 cd	4,3 b*
<i>Fusarium verticillioides</i>	6,9 d	2,9 a*	4,5 b*	5,0 bc*
<i>Fusarium graminearum</i>	7,9 g	5,2 bc*	5,9 cdef*	6,0 cdef*
<i>Fusarium lateritium</i>	7,9 g	6,0 cdef*	7,5 g	7,3 g
<i>Fusarium moniliforme</i>	8,2 g	6,0 cdef*	7,2 g	7,4 g
<i>Fusarium poae</i>	8,2 g	7,0 g	7,4 g	8,2 g
<i>Fusarium culmorum2</i>	8,2 g	8,2 g	8,1 g	8,2 g
<i>Fusarium culmorum1</i>	8,2 g	8,2 g	8,1 g	8,2 g
<i>Microdochium nivale</i>	8,2 g	8,2 g	8,1 g	8,2 g
<i>Fusarium culmorum3</i>	8,2 g	8,2 g	8,2 g	8,2 g

Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes selon le test de Newman -Keuls au seuil de 5%. \* : Statistiquement différent du témoin non inoculé.



## Résultats et Discussion

L'analyse de la variance du diamètre moyen de la croissance mycélienne des isolats fongiques testés sous l'effet des trois rhizobactéries a montré l'existence d'une différence très hautement significative (**Tableau 13, Annexe II**).

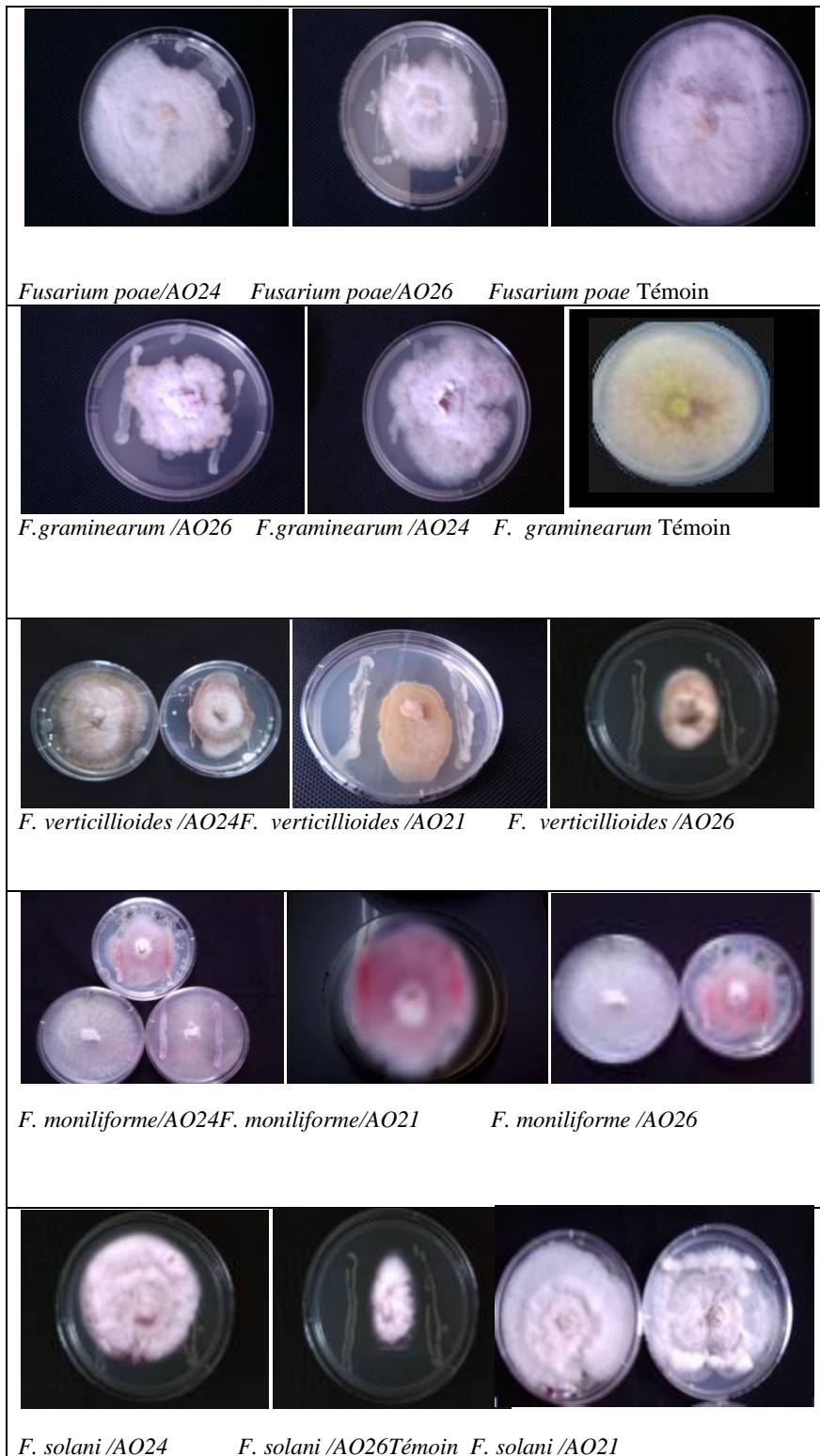
Les résultats mentionnés dans le **tableau 9** montrent l'existence d'une nette réduction du diamètre moyen de la croissance mycélienne de certains isolats de *Fusarium* spp. en présence des 3 souches rhizobactériennes codées AO26, AO24 et AO21 par rapport aux témoins correspondants non inoculés. Une réduction significative de la croissance mycélienne suite à la confrontation des souches bactériennes avec *F. solani*, *F. verticillioides*, *F. graminearum*, *F. lateritium* et *F. moniliforme* a été notée. Cette réduction varie de 24% à 57% pour la souche AO26, de 17% à 35% pour la souche AO24 et de 24% à 37% pour la souche AO21 (**tableau 9**). A l'égard du reste des isolats, les trois souches rhizobactériennes n'ont eu aucune action antagoniste.

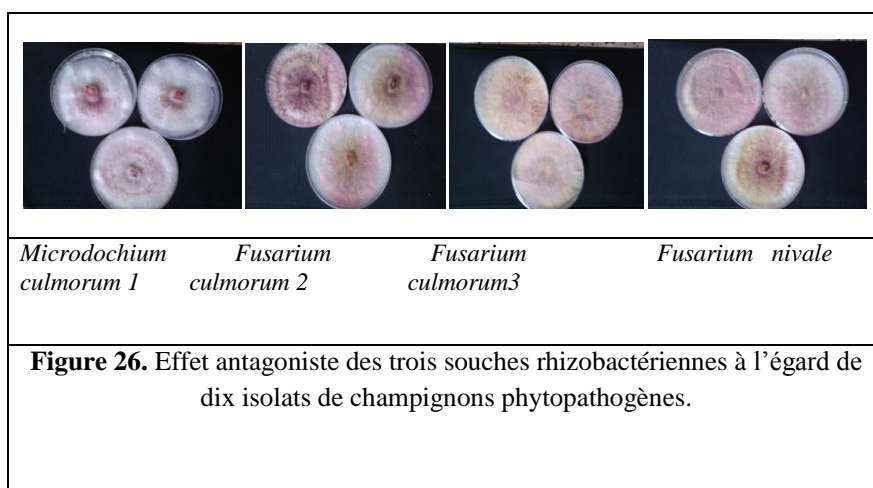
**Tableau 9.** Pourcentage de réduction de la croissance mycélienne des isolats fongiques sous l'effet des trois souches rhizobactériennes antagonistes dans le cas de la confrontation directe.

Isolat / Traitement	Taux de réduction de la croissance mycélienne (%)		
	AO26	AO24	AO21
<i>Fusarium solani</i>	49	17	37
<i>Fusarium verticillioides</i>	57	35	28
<i>Fusarium graminearum</i>	33	25	24
<i>Fusarium lateritium</i>	24	5	8
<i>Fusarium moniliforme</i>	26	12	10
<i>Fusarium poae</i>	15	10	0
<i>Fusarium culmorum2</i>	0	1	0
<i>Fusarium culmorum1</i>	0	1	0
<i>Microdochium nivale</i>	0	1	0
<i>Fusarium culmorum3</i>	0	0	0

La **figure 26** illustre les résultats de la croissance mycélienne des isolats fongiques sous l'effet des trois souches rhizobactériennes antagonistes.

Résultats et Discussion





### 6. Effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes sélectionnées à l'égard de cinq souches de bactéries phytopathogènes

Les résultats relatifs au test du pouvoir antimicrobien des trois rhizobactéries codées AO21, AO24 et AO26 à l'égard de cinq bactéries phytopathogènes sont rapportés dans le tableau 10 :

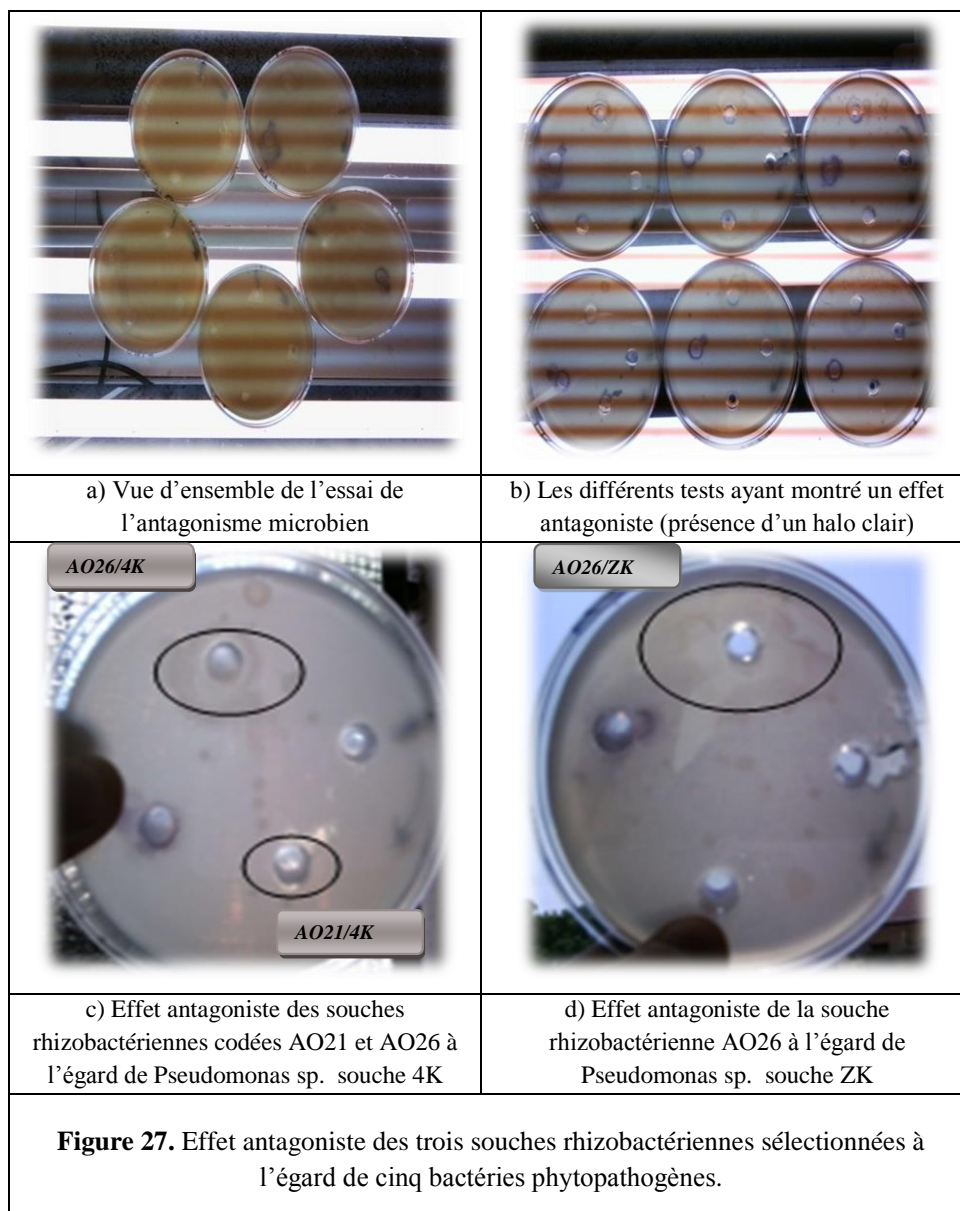
**Tableau 10.** Effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes à l'égard de cinq bactéries phytopathogènes

Souches	Souches rhizobactériennes antagonistes		
	AO26	AO24	AO21
<i>JN1</i>	—	—	—
<i>JN2</i>	—	—	—
<i>JN3</i>	—	—	—
<i>ZK</i>	+++	—	—
<i>4K</i>	++	—	+

- : absence d'un halo clair  
+ : présence d'un halo clair

## Résultats et Discussion

La mise en culture duelle des souches rhizobactériennes antagonistes avec des bactéries phytopathogènes se traduit par l'apparition d'un halo clair autour des colonies des bactéries testées. C'est le cas de la souche codée AO26 mise en culture duelle avec les souches phytopathogènes *Pseudomonas* sp. ZK et 4K où nous avons observé une zone d'inhibition de 2 à 7 mm. La souche AO21 a également exercé un effet inhibiteur de 1 à 3 mm (**Figure 27**). La souche AO21 n'a eu aucune action antagoniste à l'égard de la plupart des souches phytopathogènes.



## 7. Discussion

Les expérimentations réalisées dans le cadre de ce travail visaient l'évaluation de deux aspects majeurs ; le premier concerne l'effet des différentes souches rhizobactériennes sur la croissance de blé dur. Le second évalue le pouvoir antagoniste des souches les plus prometteuses vis-à-vis de quelques champignons et bactéries phytopathogènes.

### 7.1 Isolement et purification des rhizobactéries

L'isolement des rhizobactéries mené à partir d'échantillons de cultures de blé dur de différentes provenance à savoir, les régions de Oued El Berdi, Ain Laloui et Khabouzia nous a permis d'obtenir 26 souches rhizobactériennes. Après purification de ces dernières, seulement 22 souches ont pu être repiquées, le reste qui représente 15% du total n'a pas pu être cultivé. En fait, l'étude des populations reposant sur la culture préalable des microorganismes n'offre qu'une vision partielle de la diversité microbienne dans la mesure où la grande majorité (90 à 99%) des microorganismes, n'est pas cultivable (Amann *et al.*, 1995). Aussi plusieurs auteurs qui ont menés leurs études sur la dynamique des populations bactériennes ont pu isoler un nombre beaucoup plus important de souches bactériennes du sol en utilisant des protocoles expérimentaux différents, et dans ce cas ils ont prouvé que le facteur limitant la détection des bactéries était la méthode de leur extraction et de leur récupération d'où la nécessité d'un protocole expérimental adéquat pour optimiser l'extraction des bactéries du sol (Gouzou, 1999).

### 7.2 Sélection des souches stimulatrices de la croissance végétale

#### 7.2.1 Effet de 22 souches rhizobactériennes sur la germination de la variété Chen's de blé dur

Une présélection des souches a été réalisée *in-vitro* par un test de germination mené sur une seule variété de blé dur, la variété Chen's, nous a permis de sélectionner 19 souches rhizobactériennes comme étant délétères de la croissance végétale. Les résultats de l'étude du taux de germination et celui des longueurs de coléoptiles des graines traitées par les différentes souches bactériennes isolées nous ont permis de conclure qu'il existe une diversité dans le pouvoir délétère de ces bactéries. Ceci corrobore les travaux qui ont abordé l'inhibition de la germination des graines par les bactéries délétères, appelées en anglais « Deleterious Rhizobacteria » ou DRB. Ce processus de détérioration est généralement

accompagné d'une diminution de la capacité germinative (parfois même une perte totale de la viabilité) ce qui peut se traduire par des rendements faibles.

Contrairement aux résultats précédents, l'inoculation par les trois souches codées AO21, AO24 et AO26 semble légèrement améliorer le taux de germination et la croissance de coléoptiles ce qui permet de soupçonner un effet phytostimulateur des souches rhizobactériennes. **Walker (2010)**, dans son étude sur l'impact de l'inoculation des micro-organismes phytobénéfiques sur le métabolisme secondaire de *Zea mays* L., indique que l'effet PGPR ne se manifeste pas sur les biomasses ni sur les longueurs racinaires en condition *in-vitro*. Il est à noter que la croissance de la plantule pendant 10 jours se fait uniquement sur les réserves de la graine car le milieu utilisé pour la culture n'est pas supplémenté en nutriments. Selon le même auteur, quelques paramètres permettent toutefois d'indiquer un effet des souches phytostimulatrices, à titre d'exemple il note les analyses des structures racinaires par le logiciel Winrhizo® le nombre d'extrémités, le nombre de croisements ainsi que les analyses des exsudats racinaires par chromatogramme.

### 7.2.2 Effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la germination de cinq variétés de blé dur

Les souches ayant montré un pouvoir stimulateur de la croissance à l'issue du premier test préliminaire mené sur la variété Chen's de blé dur ont subi un deuxième test ayant pour but l'évaluation d'une éventuelle activité phytostimulatrice sur cinq variétés de blé dur.

Globalement, il ressort des résultats obtenus relatifs au taux de germination que la souche AO26 a entraîné le meilleur résultat avec la variété Massinissa et GTA dur, en plus de ces variétés, la souche AO24 a amélioré le taux de germination de la variété Maghres. Avec la variété Chen's nous n'avons pas obtenu les mêmes résultats que ceux du test préliminaire que ce soit avec les traitements inoculés ou le témoin non inoculé. Cette variabilité dans les résultats obtenus peut être liée à des facteurs qui peuvent influencer le pouvoir germinatif des graines, tels que des facteurs liés à la pureté variétale, et et/ou la stabilité des caractères (Chen's est une semence de multiplication G3), et dans ce cas on aura des facteurs intrinsèques qui ne sont pas stables, ces derniers, selon **Bove et al. (2001)**, participent à l'activation des hormones et des enzymes qui sont essentielles à la germination

En ce qui concerne la longueur du coléoptile, les trois rhizobactéries ont provoqué un effet stimulateur envers la variété Massinissa. Avec les autres variétés, des résultats hétérogènes dans le pouvoir stimulateur ont été obtenus.

D'après ces résultats, on conclut qu'une souche bactérienne donnée peut se comporter d'une manière différente avec des variétés différentes de la même plante. Cela peut être dû aux différents mécanismes d'action mis en jeu par les partenaires.

Dans des essais d'inoculations bactériennes, c'est surtout des tests sur une gamme variée de plantes qui sont effectués. A titre d'exemples, nous notons les travaux entrepris par **Berge et al. (1990 et 1991)** sur le blé et sur le maïs ; **Brahim (1998)** sur les conifères ; **Adjanohoun et al. (2012)** sur maïs des sols ferrallitiques ; **Boukerma (2012)** et **Aroca (2014)** sur tomate....

### **7.3 Effet de trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la croissance de blé dur variété Massinissa cultivée en pots**

Le cycle de développement d'une céréale comprend trois grandes périodes : la période végétative, la période reproductrice et la période de maturation. Pour l'ensemble des céréales, la période végétative comprend trois phases :

- la phase semis-levée; durant cette phase nous avons évalué le taux d'émergence des graines de blé dur var. Massinissa sous l'effet de trois souches rhizobactériennes.
- la phase levée-début tallage; nous avons suivi le développement des différentes feuilles.
- la phase tallage-montaison

Les plantes sont constamment soumises au cours de leur développement aux attaques d'agents pathogènes qui entraînent des maladies plus ou moins sévères selon le degré de virulence de ces derniers et des conditions climatiques qui favorisent la propagation de la maladie. Lors de notre essai, mené pendant la période estivale qui se caractérise par des températures et un taux d'humidité élevés favorables au développement des maladies, nous avons constaté un jaunissement et un dessèchement des feuilles de la base beaucoup plus sur les plants témoins (non traités par les souches rhizobactériennes). Après une à deux semaines, nous avons remarqué le même symptôme sur les autres plants traités suivi d'un dessèchement des extrémités des feuilles supérieures. A ce stade, les plants témoins étaient presque totalement desséchés. Cela peut être expliqué d'une part, par une stimulation des réactions de défense des

plantes suite à leur inoculation par les rhizobactéries leur permettant de se protéger contre les agents pathogènes, ou par le biais de métabolites secondaires toxiques produits par les souches antagonistes qui contrôlent les activités de la microflore pathogène présente dans la rhizosphère. Cependant, les symptômes observés ne correspondent à aucune maladie proprement dite à ce stade d'où l'intérêt de penser à d'autres explications plus logiques. A l'instar des maladies causées par les agents phytopathogènes, les maladies physiologiques peuvent également avoir lieu et ont différentes origines.

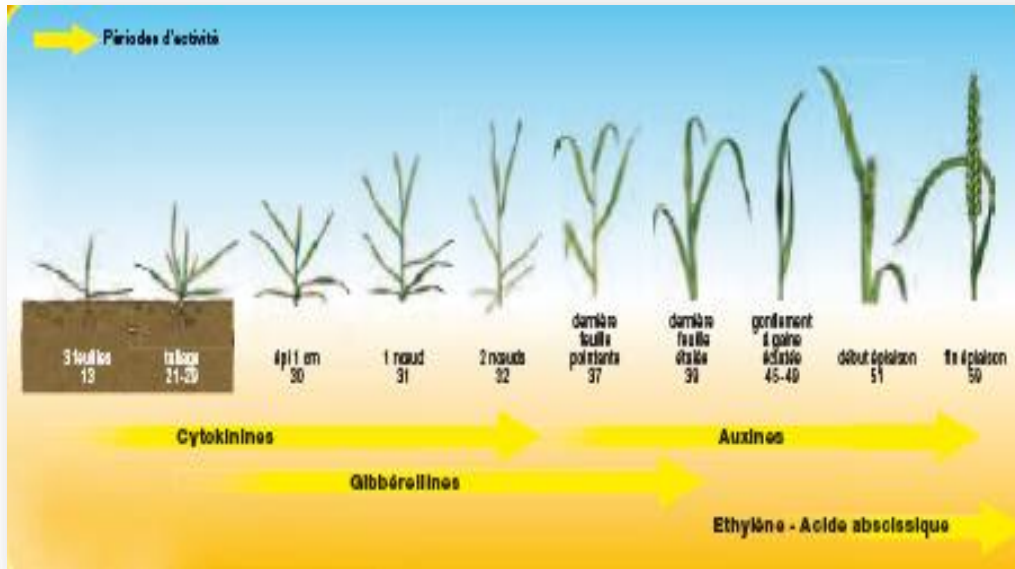
Durant notre expérimentation, nous avons suivi régulièrement le développement des différentes feuilles. Selon **Moule (1979)**, la vitesse de croissance des feuilles des céréales pendant la phase végétative dépend essentiellement de la température. **Plouffe (2012)**, également indique que l'apparition des stades de développement est influencée par la température (cumul thermique, degré jour et évapotranspiration maximale) car l'évolution des stades à tout moment est une réponse à la température, photopériode et le stade de développement précédent.

La phase semis-levée se réalise pour une somme des températures constante et caractéristique de l'espèce. Elle est de 121 à 122 °C pour le blé. Durant notre essai, cette phase a duré 7 jours avec une somme de température de 187°C (**Annexe IV**).

Dans des conditions de culture optimale, la première talle (t 1) se forme généralement à l'aisselle de la première feuille lorsque la plante est au stade «4 feuilles » durant une période de 3 à 4 semaines depuis le semis, tandis que lorsque les conditions ne sont pas favorables l'apparition des talles est retardée (**Hamadache, 2013**).

L'augmentation de la température moyenne se traduit par une sénescence induite des plantes et par conséquent, entraînerait sur le plan biochimique la production naturelle de l'éthylène  $H_2C=CH_2$ , hormone qui affecte quasiment tous les aspects de la croissance et du développement de la plante. La **figure 28** illustre la distribution des hormones végétales durant tout le cycle de développement de la plante.

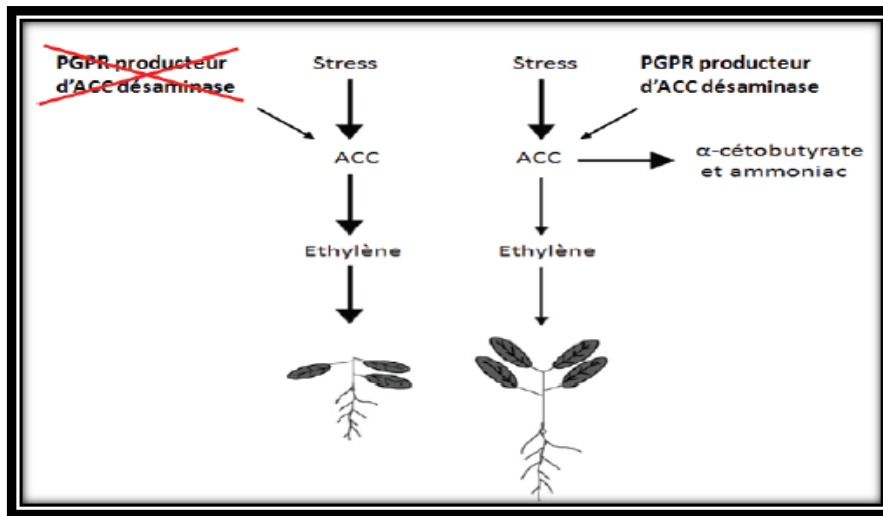




**Figure 28** : Distribution des hormones végétales durant tout le cycle de développement de la plante, exemple d'une céréale ([www.basf-agro.fr](http://www.basf-agro.fr))

Parmi les mécanismes d'actions directes impliquées dans les processus de stimulation de la croissance des plantes par les PGPR est la réglementation des niveaux d'hormones végétales en maintenant de faibles niveaux de production d'éthylène dans le cas d'un stress (Antoun & Prévost, 2005 ; Porcel *et al.*, 2014), et on suppose que c'est le cas de notre expérimentation.

Certaines bactéries appartenant au groupe des PGPR producteurs de l'ACC désaminase ont la capacité de réguler et d'abaisser les niveaux de l'éthylène en réponse à une multitude de stress biotiques et abiotiques comme la salinité, la sécheresse et les variations de température. Le mécanisme principal, qui est utilisé par les rhizobactéries qui dégradent l'éthylène, est la destruction de l'éthylène par l'enzyme ACC désaminase (CE 4.1.99.4) à l'alpha cétoacétate et d'ammonium (Grichko et Glick, 2001). Cet enzyme peut diminuer ou prévenir les effets nocifs du haut niveau éthylène (Figure 29). L'éthylène est une phytohormone produite de manière endogène par les plantes, sa surproduction conduit à l'inhibition de l'élongation racinaire et, par conséquent, la croissance de la plante dans son ensemble, et sa diminution, grâce à l'ACC désaminase, permet d'observer une élongation racinaire (Glick *et al.*, 2004).



**Figure 29:** Représentation schématique de l'effet de l'absence (gauche) ou de la présence (droite) de PGPR producteurs d'ACC désaminase quand la plante subit un stress (biotique ou abiotique). La taille des flèches indique le degré relatif du flux. (Adapté de **Glick et al., 2004**)

Selon **Alabouvette & Cordier (2012)**, il n'est pas possible de dresser de frontière stricte entre les mécanismes responsables de la bio-protection, de la bio-fertilisation ou de la bio-stimulation, d'autant plus que ces différents modes d'action ne sont pas exclusifs l'un de l'autre, mais peuvent s'exprimer simultanément. En ce qui concerne le poids sec des différentes parties de la plante, nos résultats corroborent les travaux entrepris par **Ahn (2007)**, qui a enregistré une augmentation du poids sec total de maïs par des souches de *Pseudomonas* spp. De même, **Kirdi (2011)** a sélectionné 2 souches rhizobactériennes codées FKF5100 et FKS560 qui ont assuré une augmentation significative du poids sec de la partie aérienne de 4 espèces de plantes cultivées dont le blé et l'orge.

#### 7.4 Effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes sélectionnées à l'égard de quelques agents phytopathogènes

Le degré d'antagonisme varie selon que les interactions se produisent avec des bactéries ou des champignons.

##### 7.4.1. Effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes à l'égard de dix isolats de champignons phytopathogènes

L'inhibition a été plus nettement observée vis-à-vis des espèces fongiques par la souche AO26 qui a montré un spectre d'antagonisme variant de 15 à 57% contre plusieurs espèces fusariennes qui affectent les céréales et qui forment un complexe de maladies sur la semence, les plantules et les plantes adultes, parmi lesquelles *F. graminearum*, *F. solani*, *F. culmorum*, *F. moniliforme* et *Microdochium nivale* sont les plus dominants en Algérie (**Hadjout et al., 2014; Moumene et al., 2014**).

Dans un travail mené par **Brahim (1998)**, les résultats de la méthode de la double couche *in-vitro* ont confirmé que les souches de *Bacillus polymyxa* sécrètent des substances antifongiques qui diffusent dans la gélose et inhibent la croissance de plusieurs champignons phytopathogènes. Certains isolats antagonistes agissent sur les champignons phytopathogènes en arrêtant (action fongicide) ou en ralentissant (action fongistatique) leur croissance. Les travaux effectués sur *Bacillus polymyxa* montrent que cette espèce synthétise des substances antibiotiques telles que Fusaricidins B, C et D ou des enzymes protéolytiques et hydrolytiques (cellulase, mannanase et xylanase) qui dégradent la paroi cellulaire des champignons phytopathogènes.

**Brahim (1998)** rajoute que les microorganismes qui montrent un effet antagoniste sur gélose ne sont pas nécessairement inhibiteurs des agents phytopathogènes *in-vivo*. La colonisation des racines et la stabilité d'un micro-organisme antagoniste dans la rhizosphère sont des facteurs déterminants pour le succès d'une application *in-vivo*.

### 7.4.2. Effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes à l'égard de cinq bactéries phytopathogènes

Les résultats du test de la confrontation directe relative à l'antagonisme bactérien nous a permis d'observer des zones d'inhibition de 2 à 7 mm et de 1 à 3 mm, causées par les souches AO26 et AO21, respectivement. Ces zones d'inhibition indiquent la diffusion dans le milieu d'une substance antibactérienne non volatile sécrétée par les souches AO26 et AO21 efficaces contre les souches phytopathogènes. Nos résultats rejoignent les travaux menés par **Admilton et al. (2011)** visant l'évaluation de l'activité antibiotique des composés extracellulaires produits par *Pseudomonas* sp. (Souche LV) à l'égard de *Xanthomonas citri* pv. *citri*, (souche 360). Ces auteurs ont montré qu'une fraction obtenue à partir d'un filtrat de culture de *Pseudomonas* sp. avait un effet antibiotique très prononcé vis-à-vis de la souche 306 de *Xanthomonas citri* pv. *citri in-vitro*.

## *Résultats et Discussion*

Dans des expériences de confrontation de microorganismes *in-vitro*, **Jacobsen (2006)**; **Montesinos et al. (2009)**; **Alabouvette & Cordier (2012)** indiquent que la production d'antibiotiques et de métabolites antimicrobiens est un mode d'action bien établi et le plus étudié chez les agents de lutte biologique. Leur production semble optimale *in-vitro* dans le cas d'une densité microbienne élevée et dans des conditions de croissance limitée (**Haas & Kell, 2003**). Des groupes de gènes responsables de la production de plusieurs antibiotiques bactériens ont été clonés et manipulés dans le but d'augmenter la production chez les agents de lutte biologique ou de les introduire dans d'autres organismes.

Nos résultats de l'antagonisme soulignent la possibilité d'un effet à large spectre affectant des champignons appartenant à différentes espèces fongiques mais aussi bactériennes. La souche de *Pseudomonas chlororaphis* a produit entre deux et trois substances à effet antibiotique retrouvés dans le surnageant de culture, ayant une activité à la fois antifongique et antibactérienne (**Mezaache, 2012**).

**Kirdi (2011)** a montré que trois souches rhizobactériennes codées FKF5100, FKS560 et BRS983 ont révélé des potentialités importantes dans la lutte contre deux mauvaises herbes parasites ; *Orobanche crenata* et *Cuscuta campestris*.

# *Conclusion et perspectives*

## **Conclusion générale et perspectives**

Le présent travail nous a permis d'obtenir à partir des isollements effectués sur des plants de blé dur, en se basant sur les critères morphologiques, une collection de 22 souches rhizobactériennes, dont 12 (soit 54%) se sont révélées inhibitrices de la germination des graines et/ou de l'élongation du coléoptile des graines de blé germées.

Par contre, trois souches rhizobactériennes codées AO21, AO24 et AO26 ont montré une légère stimulation de la croissance des plants de blé lors des tests *in-vitro*, statistiquement non différente de celle des plants témoins non inoculés, et, par conséquent, ne peuvent pas être considérées comme étant PGPR sur le stade de germination.

Les résultats de l'inoculation en pots avec deux modes d'application : l'enrobage de la semence et la suspension bactérienne ont permis d'avoir des résultats significatifs durant toute la période de notation des paramètres d'évolution de la culture de blé variété *Massinissa*. La souche AO24 a permis d'avoir le meilleur stade de croissance, tandis que le poids sec moyen le plus important était obtenu par la souche AO26 suivi des souches AO21 et AO24. La comparaison des résultats obtenus pour les deux modes d'inoculation montre que l'application de l'inoculum sous forme de suspension bactérienne est meilleure que l'enrobage de la semence. Les conditions dans lesquelles était mise la culture ainsi que son état sanitaire laisse supposer que les résultats obtenus en comparaison par rapport aux témoins non inoculés sont dus à une bio protection conférée par les bactéries antagonistes et non pas par un effet stimulateur de la croissance. Il s'agit probablement de bactéries promotrices de la santé végétale nommées par **Sikora&Hoffmann-Hergarten (1993)** « Plant Health Promoting Rhizobacteria ».

L'évaluation du potentiel phyto-stimulateur ou inhibiteur des souches rhizobactériennes évalué par inoculation sur graines de blé dur en estimant le pourcentage de germination et la longueur du coléoptile nous a permis d'obtenir des résultats au bout de 3 à 5 jours d'incubation. C'est une technique rapide qui permet aux améliorateurs de détecter l'activité inhibitrice des souches délétères. Par contre, pour les PGPR il faut trouver une éventuelle corrélation entre la stimulation évaluée *in-vitro* et celle par l'inoculation *in-situ* qui met en relation les composants sol-climat-plante (tout le cycle).

## *Conclusion générale*

Nous avons testé les souches sélectionnés sur des agents phytopathogènes de la rhizosphère de blé. La majorité de ces tests ont confirmé le pouvoir antagoniste des 3 souches rhizobactériennes codées AO26, AO24 et AO21 .

Sur les champignons, ces rhizobactéries agissent probablement en sécrétant des substances fongistatiques dans le milieu de culture efficaces contre les isolats des champignons phytopathogènes testés. Cependant, l'action antifongique de ces souches ne se révèle pas nécessairement *in-vivo* d'après les différentes recherches réalisées dans ce sens.

Une variabilité est notée dans l'inhibition de la croissance mycélienne des espèces pathogènes appartenant à *Fusarium* spp. en présence des 3 souches rhizobactériennes codées AO26, AO24 et AO21 par rapport aux témoins. Ainsi une réduction significative de la croissance mycélienne est entraînée par la souche codée AO26 contre *Fusarium solani*, *Fusarium verticillioides*, *Fusarium graminearum*, *F. lateritium* et *F.moniliforme*. Les tests de confrontation directe ont inversement montré, un recouvrement total des trois souches rhizobactériennes par tous les isolats pathogènes testés appartenant à *Fusarium culmorum* et *Microdochium nivale*, signifiant qu'elles n'ont aucune action antagoniste envers ces isolats fongiques.

La mise en culture duelle des trois rhizobactéries avec des bactéries phytopathogènes du genre *Pseudomonasa* mis en évidence une zone d'inhibition allant de 2 à 7 mm, indiquant la production probable de substances diffusibles dans le milieu par les souches AO26 et AO21 efficaces contre les bactéries phytopathogènes codées ZK et 4K.

❖ **Perspectives**

Au terme de ce travail, nous envisageons de continuer nos recherches sur certains axes pertinents relatifs aux PGPR et qui méritent d'être étudiés:

Il est intéressant d'approfondir les études pour : (i) une connaissance précise des principaux déterminants de la suppression des champignons et/ou de bactéries phytopathogènes par les bactéries PGPR et (ii) déterminer les principaux métabolites synthétisés par ces microorganismes, qui auraient un impact bénéfique sur les plantes.

L'établissement d'un système de lutte biologique dépend nécessairement de la stabilité et de la survie des micro-organismes antagonistes et/ou stimulateurs au niveau de la rhizosphère. Par conséquent, la poursuite des travaux nécessite l'étude du pouvoir colonisateur des bactéries sélectionnés au niveau de la rhizosphère et l'évaluation de leur effet d'une part sur la croissance de la plante cible, et d'autre part sur le développement des autres microorganismes pour ne pas créer un déséquilibre dans l'environnement.

Il est intéressant d'effectuer un échantillonnage plus large dans les principales zones céréalières du pays et dans les différents étages bioclimatiques, afin d'obtenir des souches qui peuvent être plus efficaces. L'identification morphologique des bactéries isolées doit être confirmée par les outils moléculaires.

Il serait également intéressant de trouver des formulations en vue de produire des biopesticides à base d'agents antagonistes qui se montrent efficaces.

Ce travail met en exergue l'existence d'une faune bénéfiques dans la rhizosphère du blé et qui nécessite des études plus poussées afin de trouver des moyens pouvant atténuer la nocivité des agents pathogènes sur blé et en même temps l'amélioration de la production des végétaux en générale et des blés en particulier.



*Références  
bibliographiques*

\*A\*

- Aarons S., Abbas A., Adams C., Fenton A., & O'gara F., 2000.** ARegulatory RNA (PrrB RNA) Modulates Expression of Secondary Metabolite Genes in *Pseudomonas fluorescens* F113.*J.Bacteriol.*, (182), **14**: 3913–3919.
- Abis S., Blanc P., Lerin F& Mezouaghi M., 2009.**Perspectives des politiques agricoles en Afrique du Nord. Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches, CIHEAM. Paris,**64**:93-141.
- Achouak W., Normand P & Heulin T., 1999.** Comparative phylogeny of *rrs* and *nifH* genes in the *Bacillaceae*.*Int. J. Syst.Bacteriol.*, **49**: 961-967.
- Adam A., 2008.** Elicitation de la résistance systémique induite chez la tomate et le concombre et activation de la voie de la lipoxygénase par des rhizobactéries non-pathogènes. Thèse de Doctorat. Université de Liège. Belgique, 194p.
- Adjanohoun A., Noumavo P.A., Sikirou R., Allagbe M., Gotoechan-hodonou H., Dossal k.k., Yehouenou B.,Glele kakai R & Baba-moussa L., 2012.**Effets des rhizobactéries PGPR sur le rendement et les teneurs en macroéléments du maïs sur sol ferralitique non dégradé au Sud-Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **6(1)**: 279-288.
- Ahn P., 2008.** Glufosinate Ammonium-Induced Pathogen Inhibition and Defense Responses Culminate in Disease Protection in bar-Transgenic Ric.*Plant Physiology*, **146**: 213–227.
- Alabouvette C & Cordier C., 2012.** Les *Trichoderma*. trois fois bénéfiques ? Bio-protecteurs. bio-fertilisants. bio-stimulant? Un peu des trois, mais gare aux généralisations. *Phytoma*, **652**:17-21.
- Alami Y., Achouak W., Marol C & Heulin T.,2000.** Rhizosphere soil aggregation and plant growth promotion of sunflower by an EPS-producing *Rhizobium sp.* isolated from sunflower roots. *Appl. Environ. Microbiol.*, **66 (8)**: 3393-8.
- Algérie Presse Service, 2014.** Légère baisse des importations des céréales en 2013.Infos El Watan « Economie».<http://www.info@aps.dz>
- Amann R.I., Ludwig W & Schleifer K.H., 1995.**Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation.*Microbiol.*,**59**: 143-169.

- Amellal N., Bartoli F., Villemin G., Talouizte A & Heulin T., 1999.** Effects of inoculation of EPS-producing *Pantoea agglomerans* on wheat rhizosphere aggregation. *Plant Soil*, **211**: 93-101.
- Antoun H& Prévost D., 2005.** Ecology of plant growth promoting rhizobacteria. In Siddiqui Z.A (ed.). PGPR: Biocontrol and Biofertilization. Springer, pp.: 0138.
- Aroca R., 2014.** Involvement of plant endogenous ABA in *Bacillus megaterium* PGPR activity in tomato plants. *BMC Plant Biology*, 02-12. <http://www.biomedcentral.com>
- Aubertot J.N., Clerjeau M., David C., Debaeke P., Jeuffroy M.H., Lucas P., Monfort F., Nicot P & Sauphanor B., 2013.** Stratégies de protection des cultures. Expertise scientifique collective. Pesticides, agriculture et environnement, 104p.
- Audenaert K., Pattery T., Cornélis P. & Höfte M., 2002.** Induction of systemic resistance to *Botrytis cinerea* in tomato by *Pseudomonas aeruginosa* 7NSK2: Role of salicylic acid, pyochelin, and pyocyanin. *Mol. Plant Microbe Interact.*, **15(11)**:1147-1156.
- Aya A., N'dril. N., Irié V.B., Patrice L.K & Irié A.Z.B., 2011.** Bases génétiques et biochimiques de la capacité germinative des graines: implications pour les systèmes semenciers et la production alimentaire. *Sciences & Nature*, **8(1)**:119-137.

**\*B\***

- Bakker P.A.H.M., Van Peer R. & Schippers B., 1991.** Suppression of soil-borne plant pathogens by fluorescent pseudomonads: mechanisms and prospects. pp. :217-230.
- Baluska F. & Ninkovic V. (Eds.), 2010.** Plant Communication from an Ecological Perspective. Springer. Germany, 252 p.
- Barazani O & Friedman J., 1999.** Is IAA the major root growth factor secreted from plant-growth-mediating bacteria? *J. Chem. Ecol.*, **25**:2397-2406.
- Bashan Y. & De-Bashan L.E., 2010.** How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth, a critical assessment. *Adv. Agron.*, **108**: 77-136.
- Baudry C. & Brézellec H., 2006.** Microbiologie-Immunologie: Cahiers du Préparateur. Porphyre (2<sup>ème</sup> édition). France, 126p.
- Beattie G. A., 2006.** Plant Associated Bacteria : Survey, Molecular Phylogeny Genomics and Recent Advances. In Plant-Associated Bacteria, Gnanamanickam S.S. (ed.). Springer, Dordrecht, Netherlands, pp.: 1-56

- Beauchamp C.J., 1993.** Mode of action of plant growth-promoting rhizobacteria and their potential use as biological control agent. *Phytoprotection*, **74**: 19-27.
- Bendif N., 1994.** La situation actuelle des maladies des céréales en Algérie. *Céréaliculture*. **22**:8-12.
- Benhamou N. & Picard K., 1999.** La résistance induite : une nouvelle stratégie de défense des plantes contre les agents pathogènes. *Phytoprotection*, **80 (3)**, 137-168.
- Benhamou N., 2012.** Stimulateurs des défenses naturelles des plantes : une nouvelle stratégie phytosanitaire dans un contexte d'écoproduction durable. I. Principes de la résistance induite. *Phytoprotection*, **92 (1)**: 1-23.
- Berg G., Zachow C., Lottmann I G., Götz M., Costa R. & Smalla K., 2005.** Impact of Plant Species and Site on Rhizosphere-Associated Fungi Antagonistic to *Verticillium dahliae* Kleb. *Applied and Environmental Microbiology*, pp.: 4203–4213.
- Berge O., Fages J., Mulard D & Balandreau J., 1990.** Effects of inoculation with *Bacillus circulans* and *Azospirillum lipoferum* on crop yield in field grown maize. *Symbiosis*, **9**:259-266.
- Berge O., Heulin T., Achouak W., Richard C., Bally R & Balandreau J., 1991.** *Rahnella aquatilis*, a nitrogen-fixing enteric bacterium abundant in the rhizosphere of wheat and maize. *Can. J. Microbiol.*, **37**:195-203.
- Berge O., 2011.** Écologie des populations bactériennes associées aux eucaryotes photosynthétiques: de la rhizosphère à la phycosphère. INRA-PACA. Unité de Pathologie Végétale UR407, 83p.
- Bhattacharjee R.B., Singh A. & Mukhopadhyay S.N., 2008.** Use of nitrogen fixing bacteria as biofertilizer for non-legumes: prospects and challenges. *Appl. Microbiol. Biot.* **80**: 199–209.
- Blumer C., Heeb S., Pessi G. & Haas D., 1999.** Global GacA-steered control of cyanide and exoprotease production in *Pseudomonas fluorescens* involves specific ribosome binding site. *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, **96**: 14073–14078.
- Boukerma L., 2012.** Efect des PGPR (*Pseudomonas* ssp. *fluorescens*) sur le biocontrol et l'induction de la resistance systémique. Thèse de Magister, ENSA, El-Harrach, 115p.
- Bove J., Jullien M & Grappin P., 2001.** Functional genomics in the study of seed germination. *Gen. Biol*, **3 (1)**: 10021–10025.

## Références bibliographiques|

**Brahim S., 1998.** Isolement à partir de la rhizosphère des conifères de bactéries et d'actinomycètes antagonistes aux champignons phytopathogènes. Mémoire présenté à la faculté des études supérieures de l'Université Laval pour l'obtention du grade de maître ès science (M. Sc.). 69p.

**Bravin M.N., 2008.** Processus rhizosphériques déterminant la biodisponibilité du cuivre pour le blé dur cultivé en sols à antécédent viticole. Thèse de Doctorat. Centre International d'Études Supérieures En Sciences Agronomiques. Montpellier SupAgro, 237p.

**Brodhagen M., Henkels M.D & Loper J.E., 2004.** Positive autoregulation and signaling properties of pyoluteorin, an antibiotic produced by the biological control organism *Pseudomonas fluorescens* Pf-5. *Appl. Environ. Microbiol.*, **70**: 1758-1766.

**Bruce T.J.A., Matthes M.C., Napier J.A. & Pickett J.A., 2007.** Stressful "memories" of plants: Evidence and possible mechanisms. *Plant Sci.* **173**(6):603-608.

**Budzikiewicz H., 2004.** Siderophores of the *Pseudomonadaceae sensu stricto* (fluorescent and non fluorescent *Pseudomonas* spp.). *Prog. Chem. Org. Nat. Prod.*, **87**:81-237.

\* C \*

**Castanheira N., Dourado A.C., Alves P.I., Cortés-Pallero A.M., Delgado-Rodríguez A.I., Prazeres Â., Borges N., Sánchez C., Barreto Crespo M.T & Fareleira P., 2013.** Annual ryegrass-associated bacteria with potential for plant growth promotion. *Microbiol. Res.* **169**(9-10):768-79.

**Cavaglieri L., Orlando J., Rodriguez M.I., Chulze S. & Etcheverry M., 2005.** Biocontrol of *Bacillus subtilis* against *Fusarium verticillioides in-vitro* and at the maize root level. *Microbiol. Res.*, **156**(5-6):748-754.

**Chen Y., Mei R., Lu S., Liu L. & Kloepper J.W., 1996.** The use of yield-increasing bacteria (YIB) as plant growth-promoting rhizobacteria in Chinese agriculture. *In: Management of Soilborne Disease*, C.K. Gupta and R. Utkehd, eds. Kalyani Publishers, New Delhi. pp.: 165-184.

**Choudhary D.K., Prakash A., Wray V. & Johri B.N., 2009.** Insights of the fluorescent pseudomonads in plant growth regulation. *Current Science*, **97** (2):170-179.

Field Code Changed

Field Code Changed

Field Code Changed

Field Code Changed

Field Code Changed

Field Code Changed

Field Code Changed

Field Code Changed

Field Code Changed

Field Code Changed

- Compant S., Duffy B., Nowak J., Clement C. & Ait Barka E., 2005.** Use of Plant Growth-Promoting Bacteria for Biocontrol of Plant Diseases: Principles, Mechanisms of Action, and Future Prospects. *Applied and Environmental Microbiology*, **71(9)**:4951–4959.
- Cook R.G., Thomashow L.S., Weller D.M., Mark Mazzola D.F., Gita Bangera G., & Kim D.S., 1995.** Molecular mechanisms of defense by rhizobacteria against root disease. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **92**: 4197-4201.
- Corbaz R., 1990.** Principes de phytopathologie et de lutte contre les maladies des plantes. Presses polytechniques et universitaire romandes (première édition). Lausanne. Suisse, 286p.
- Cornelis P., 2008.** The ‘core’ and ‘accessory’ regulons of *Pseudomonas*-specific extracytoplasmic sigma factors. *Molecular Microbiology*, **68(4)**: 810-812.
- \*D\***
- Dalton D.A. & Kramer S., 2006.** Nitrogen-fixing bacteria in non-legumes. In Plant Associated Bacteria. Gnanamanickam S.S. (ed.). Springer, Dordrecht, Netherlands, pp.: 105-130.
- Davet P., 1996.** Vie microbienne du sol et production végétale. Paris: Collection Mieux Comprendre. INRA Edition, 383p.
- De Coste N.J., Gadkar V.J. & Filion M., 2010.** *Verticillium dahliae* alters *Pseudomonas* spp. populations and HCN gene expression in the rhizosphere of strawberry. *Can. J. Microbiol.*; **56(11)**: 906-915.
- Delany I., Sheenan M.M., Fenton A., Bardin S., Aarons S. & O’Gara F., 2000.** Regulation of production of the antifungal metabolite 2, 4-diacetylphloroglucinol in *Pseudomonas fluorescens* F113: genetic analysis of *phlF* as a transcriptional repressor. *Microbiology*, **146**: 537–543.
- Dellagi A., Rigault M., Segond D., Roux C., Kraepiel Y., Cellier F., Briat J.-F., Gaymard F & Expert D., 2005.** Siderophore-mediated upregulation of *Arabidopsis* ferritin expression in response to *Erwinia chrysanthemi* infection. *The Plant Journal*, **43**: 262-272.
- De Meyer G. & Höft M., 1997.** Salicylic acid produced by the rhizobacterium *Pseudomonas aeruginosa* 7NSK2 induces resistance to leaf infection by *Botrytis cinerea* on bean. *Phytopathology*, **87(6)**:588-593.
- De Meyer G., Audenaert K & Höfte M., 1999.** *Pseudomonas aeruginosa* 7NSK2-induced systemic resistance in tobacco depends on in planta salicylic acid accumulation but is not associated with PR1a expression. *Eur. J. Plant Pathol.*, **105(5)**:513-517.

## Références bibliographiques

- Djaouti M., 2010.** Renforcement des capacités des acteurs de la filière céréales en Algérie dans le cadre d'un partenariat Nord-Sud. Cas de la wilaya de Sétif. Thèse de Master. CIHEAM, **106**:125 p.
- Djebari B., 2005.** Contribution à la connaissance des bactérioses du blé, de l'orge et du triticale. Thèse. Mag. INA. El-Harrach, 92p.
- Dow M., Newman M.A. & Von Roepenack E., 2000.** The induction and modulation of plant defense response by bacterial lipopolysaccharides. *Annual Review of Phytopathology*, **38**: 241-261.
- Dubuis C., Rolli J., Lutz M., De fago G. & Haas D., 2006.** Thiamine-Auxotrophic Mutants of *Pseudomonas fluorescens* CHA0 are Defective in Cell-Cell Signaling and Biocontrol Factor Expression. *Applied and Environmental Microbiology*, **72(4)**: 2606–2613.
- Duc P. & Bezet M., 2003.** Blé : comment la fusariose de l'épi joue sur les qualités technologique et sanitaires. *Phytoma – la défense des végétaux*, **566** : 19-21.
- Duffy B.K. & Défago G., 1999.** Environmental factors modulating antibiotic and siderophore biosynthesis by *Pseudomonas fluorescens* biocontrol strains. *Appl. Environ. Microbiol.*, **65(6)**:2429-2438.

### \*E\*

- El Guilli M., Achbani E., Fahad K. & Jijakli H., 2009.** Les biopesticides: Alternatives à la Lutte Chimique?. Symposium international (AGDUME). Agriculture Durable en Région Méditerranéenne, Rabat. Maroc, pp.: 266-280.
- Erturk Y., Ercisli S., Haznedar A. & Cakmakci R., 2010.** Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on rooting and root growth of kiwifruit (*Actinidiadeliciosa*) stem cuttings. *Biol. Res.*, **43**:91-98.

### \*F\*

- Fernando W.G.D., Ramarathnam R., Akkanas-Krishnamoorthy S. & Savchuk S.C., 2005.** Identification and use of potential bacterial organic antifungal volatiles in biocontrol. *Soil Biol. Biochem.*, **37**: 955–964.
- Fuentes-Ramírez L. & Caballero-Mellado J., 2005.** Bacterial biofertilizers. In: Z.A. Siddiqui(ed). *PGPR: Biocontrol and Biofertilization*. Springer, Netherlands, pp.: 143–172.

\*G\*

- Garcia de Salmone I. E., Hynes R.K & Nelson L., 2001.** Cytokinin production by plant growth promoting rhizobacteria and selected mutants. *Can. J. Microbiol.*, **47**: 404-411.
- Gaspar T., Kevers C., Penel C., Greppin H., Reid D.M. & Thorpe T.A., 1996.** Plant hormones and plant growth regulators in plant tissue culture. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant*, **32**: 272-289.
- Gerber I.B. & Dubery I.A., 2004.** Protein phosphorylation in *Nicotiana tabacum* cells in response to perception of lipopolysaccharides from *Burkholderia cepacia*. *Phytochemistry*, **65**: 2957-2966.
- Glick B.R., Jacobson C.B., Schwarze M.M.K. & Pasternak J.J., 1994.** 1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase mutants of the plant growth promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* GR12-2 do not stimulate canola root elongation. *Can. J. Microbiol.*, **40**: 911-915.
- Glick B.R., Patten C.L., Holguin G. & Penrose D.M., 1999.** Biochemical and Genetic Mechanisms Used by Plant Growth Promoting Bacteria. Imperial College Press. London. UK, 267p.
- Glick B.R., Laskin A., Bennett J.W. & Gadd G.M., 2004.** Bacterial ACC deaminase and the alleviation of plant stress. *Advances in Applied Microbiology*, **56**: 291-312.
- Gnanamanickam S.S., 2006.** Plant associated bacteria. Springer, Dordrecht, Netherlands, 716p.
- Gnanamanickam S.S. & Immanuel J.E., 2006.** Epiphytic bacteria, their ecology and functions. In Plant-associated bacteria. Gnanamanickam S.S. (ed.). Springer, Dordrecht, Netherlands, pp.: 131-155.
- Gómez-Gómez L., Felix G. & Boller T., 1999.** A single locus determines sensitivity to bacterial flagellin in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Journal*, **18**: 277-284.
- Gómez-Gómez L. & Boller T., 2002.** Flagellin perception: a paradigm for innate immunity. *Trends Plant Sci.*, **7**: 251-256.
- Gouzou L., 1992.** Devenir d'une population bactérienne inoculée dans la rhizosphère du blé et ses effets sur la plante: Cas de *Bacillus polymyxa*. Thèse de Doctorat Université de Nancy. 173 p.
- Grichko V.P. & Glick B.R., 2001.** Amelioration of flooding stress by ACC deaminase-containing plant growth-promoting bacteria. *Plant Physiol. Biochem.* **39**: 11-17.



- Guemouri-Athmani S., Berge O., Bourrain M., Mavingui P., Thiéry J. M., Bhatnagar T. & Heulin T., 2000.** Diversity of *Paenibacillus polymyxa* populations in the rhizosphere of wheat (*Triticum durum*) in Algerian soils. *Eur. J. Soil Biol.*, 36:01-11.
- Gupta A., Gopal M. & Tilak K.V., 2000.** Mechanism of plant growth promotion by rhizobacteria. *Indian J. Exp. Biol.*, 38:856-862.
- Gust A.A., Brunner F. & Nurnberger T., 2010.** Biotechnological concepts for improving plant innate immunity. *Current Opinion in Biotechnology*, 21: 204-210.

**\*H\***

- Haas D., Keel C. & Reimmann C., 2002.** Signal transduction in plant-beneficial rhizobacteria with biocontrol properties. *Antonie van Leeuwenhoek*, 81: 385-395.
- Haas D. & Keel C., 2003.** Regulation of antibiotic production in root-colonizing *Pseudomonas* spp. and relevance for biological control of plant disease. *Annu. Rev. Phytopathol.* 41:117-153.
- Haas D. & Defago G., 2005.** Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. *Nat. Rev. Microbiol.* 3(4):307-319.
- Hadjout S., Touati-hattab S., Kedad A., Mekliche L., Bouznad Z. & Barreau C., 2014.** Occurrence de la fusariose de l'épi de blé en Algérie. Niveau de contamination des grains et évaluation des variétés et lignées de blé pour leur résistance au *Fusarium culmorum* et *F. graminearum*. 1<sup>er</sup> Workshop International sur la fusariose des céréales en Algérie. INPV. [www.inpv.edu.dz](http://www.inpv.edu.dz)
- Haggag W.M. & Saber M.S.M., 2000.** Use of compost formulations fortified with plant growth promoting rhizobacteria to control root-rot diseases in some vegetables grown in plastic-houses. *Arab J. Biotechnol.*, 4: 83-96.
- Hamadache A., 2013.** Grandes cultures: Principaux itinéraires techniques des principales espèces de grandes cultures pluviales cultivées en Algérie et en Afrique du Nord. Tome I. le blé, 256p.
- Hassan K.A., Johnson A., Shaffer B.T., Ren Q., Kidarsa Teresa A., Elbourne Liam D. H., Hartney Sierra, Duboy Robert, Goebel Neal C., Zabriskie T.M., Paulsen I.T. & Loper J.E., 2010.** Inactivation of the GacA response regulator in *Pseudomonas fluorescens* Pf-5 has far-reaching transcriptomic consequences. *Environmental Microbiology*, 12(4): 899-915.
- Heeb S. & Haas D., 2001.** Regulatory Roles of the GacS/GacA Two-Component System

## Références bibliographiques |

in Plant-Associated and Other Gram-Negative Bacteria. *Mol. Plant Microbe Interact.*, **14** (12), 1351–1363.

**Heulin T., Berge O., Hebbar K.P., Gouzou L. & Balandreau J., 1991.** *Bacillus polymyxa* and *Rahnella aquatilis*. The dominant N<sub>2</sub>-fixing bacteria associated with wheat roots in french soils. *European Journal of Soil Biology*, **30**:35-42.

**Heulin T. & Achouak W., 2012.** Les rhizobactéries productrices d'exopolysaccharides et la gestion durable des sols. *La Grande Muraille Verte*, IRD Éditions, pp. : 369-376.

**Hiltner L., 1904.** Über neuere Erfahrungen und Probleme auf dem Gebiet der Bodenbakteriologie und unter besonderer Berücksichtigung der Grundung und Brache," *Arbeiten der Deutschen Landwirtschaftlichen Gesellschaft*, **98**: 59-78.

**Hinsinger P., 2001.** Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root induced chemical changes: a review. *Plant Soil*, **237**:173-195.

**Hirt H., 2012.** Des microbes bénéfiques peuvent aider des plantes à acquérir une tolérance aux stress environnementaux. Académie d'agriculture de France. Groupe de travail sur les potentiels de la science pour l'avenir de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement, 8p.

### \*I\*

**Iavicoli A., Boutet E., Buchala A. & Métraux J.P., 2003.** Induced systemic resistance in *Arabidopsis thaliana* in response to root inoculation with *Pseudomonas fluorescens* CHA0. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, **16**: 851-858.

**Iqbal A., John P. & Shamsul H., 2008.** *Plant-Bacteria Interactions: Strategies and Techniques to Promote Plant Growth*. Wiley-Blackwell Publisher, 330p.

### \*J\*

**Jacobsen B.J., 2006.** Biological control of plant diseases by phyllosphere applied biological control agents, *in*: *Microbial ecology of aerial plant surfaces*. M. J. Bailey, A. K. Lilley, T. M. Timms Wilson and P. T. N. Spencer-Phillips, eds. Athenaeum Press, Gateshead, UK. 133-147.

**Jaimés-Miranda F., 2006.** La régulation transcriptionnelle dépendant de l'éthylène. Caractérisation fonctionnelle d'un cofacteur transcriptionnel du type MBF1 et d'un facteur de transcription de la famille des ERF chez la tomate. Thèse de Doctorat, INP de Toulouse, France. 167p.

**Jourdan E., Ongena M. & Thonart P., 2008.** Caractéristiques moléculaires de l'immunité des plantes induite par les rhizobactéries non pathogènes. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **12**: 437-449.

\*K\*

- Keller L. & Surette M.G., 2006.** Communication in bacteria: An ecological and evolutionary perspective. *Nat. Rev. Microbiol.*, **4(4)**:249-258.
- Kennedy I.R., Choudhury A.T.M.A. & Kecske's M.L., 2004.** Non-symbiotic bacterial diazotrophs in crop-farming systems: can their potential for plant growth promotion be better exploited? *Soil Biology & Biochemistry*, **36(8)**: 1229–1244.
- Kennedy N., Edwards S. & Clipson N., 2005.** Soil Bacterial and Fungal Community Structure Across a Range of Unimproved and Semi-Improved Upland Grasslands. *Microb. Ecol.*, **50(3)**:463-73
- Khakipour N., Khavazi K., Mojallali H., Pazira E. & Asadirahmani H., 2008.** Production of auxin hormone by fluorescent pseudomonads. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, **4(6)**:687-692.
- Khalfi A., 2011.** La fusariose de l'épi du blé: Caractérisation de quelques espèces de *Fusarium* spp. et essai de comportement de quelques variétés et lignées de blé tendre algériennes et française. Mém. Mag. ENSA. d'El-Harrach, Alger, 60p.
- Khan S.R., Mavrodi D.V., Jog G.J., Suga H., Thomashow L.S. & Farrand S.K., 2005.** Activation of the *phz* operon of *Pseudomonas fluorescens* 2-79 requires the LuxR homolog PhzR, N-(3-OH-hexanoyl)-L-homoserine lactone produced by the LuxI homolog *phzI*, and a cis-acting *phz* box. *J. Bacteriol.* **187**: 6517-6527.
- Kirdi B., 2011.** Rôle des PGPR dans la croissance végétale et la lutte contre les phanérogames parasites. Thèse de magister en sciences agronomiques. ENSA. 98 p.
- Kloepper J.W., Leong J., Teintze M. & Schroth M.N., 1980.** Enhancing plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. *Nature*, **286**: 885–886.
- Kloepper J.W., Scher F.M., Laliberte M. & Tipping B., 1986.** Emergence-promoting rhizobacteria: description and implications for agriculture. In: Iron, Siderophores and Plant Diseases (Swinburne T.R., ed). *Plenum. Publishing Corporation*. New York, United States of America, pp.: 155-164.
- Kloepper J.W., Rodriguez-Ubana R., Zehnder B G.W., Murphy J.F., Sikora E. & Fernández C., 1999.** Plant root-bacterial interactions in biological control of soilborne diseases and potential extension to systemic and foliar diseases. *Australasian Plant Pathology*, **28**: 21-26.

**Kloepper J.W., Ryu C.M.& Zhang S.A., 2004.** Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp. *Phytopathology*, **94(11)**:1259-1266.

**Kozlowski T.T;& Pallardy S.G., 1997.** Plant hormones and other endogenous growth regulators (chap.13). *In* Physiology of woody plants, S.G.Pallardy(ed.), 2<sup>nd</sup> Edition Academic Press. Inc. California, USA, pp. : 309- 319.

**\*L\***

**Lemanceau P., 1992.** Effets bénéfiques de rhizobactéries sur les plantes : exemple des *Pseudomonas* spp. *fluorescents*. *Agronomie*, **12**:413-437.

**Lepoivre P., 2003.** Phytopathologie: Bases moléculaires et biologiques des pathosystèmes et fondements des stratégies de lutte. De Boeck (ed.), 432 p.

**Lugtenberg B.& Kamilova F., 2009.** Plant-Growth-Promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, **63**:541-556.

**Lugtenberg B. Malfanova N., Kamilova F.& Berg G., 2013.** Plant growth promotion by microbes, *In* Molecular Microbial Ecology of the Rhizosphere, F.J. de Bruijn (ed.), Chapter 53, Vol II, pp.: 559-573. Wiley-Blackwell Publisher, 1328 p.

**\*M\***

**Marquez L.M., Redman R.S., Rodriguez R.J.&Roossinck M.J., 2007.** A virus in a fungus in a plant three way symbiosis required for thermal tolerance. *Science*, **315**:513–515.

**Martínez-Viveros O., Jorquera M.A., Crowley D.E., Gajardo G.&Mora M.L., 2010.** Mechanisms and Practical Considerations Involved in Plant Growth Promotion by Rhizobacteria. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* **10 (3)**: 293 – 319.

**Maurhöfer M., Hase C., Meuwly P., Métraux J.P. & Défago G., 1994.** Induction of systemic resistance of tobacco necrosis virus by the root-colonizing *Pseudomonas fluorescens* strain CHA0: influence of the *gacA* gene and of pyoverdine production. *Phytopathology*, **84**: 139-146.

**Maurhöfer M., Baehler E., Notz R., Martinez V.& Keel C., 2004.** Cross talk between 2,4-diacetylphloroglucinol-producing biocontrol pseudomonads on wheat roots. *Applied Environmental Microbiology*, **70**: 1990-1998.

**Mercado-Blanco J.& Bakker P.A.H.M., 2007.** Interactions between plants and beneficial *Pseudomonas* spp.: exploiting bacterial traits for crop protection. *Antonie Van Leeuwenhoek*, **92**: 367-389.

- Mezaache S., 2012.** Localisation des déterminants de la suppression de quelques souches de *Pseudomonas* isolées de la rhizosphère de la pomme de terre. Thèse de Doctorat en Sciences Option : Microbiologie. Université Ferhat ABBAS, Sétif, 221p.
- Meziane H., Van Der Sluis I., Van Loon L.C., Höfte M.& Bakker P.A., 2005.** Determinants of *Pseudomonas putida* WCS358 involved in inducing systemic resistance in plants. *Molecular Plant Pathology*, **6(2)**:177-185.
- Mok D.W.& Mok M.C., 2001.** Cytokinin metabolism and action. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, **52**: 89-118.
- Montesinos E., Bonaterra A & Moselio S., 2009.** Pesticides, microbial, in: *Encyclopedia of microbiology*. Academic Press, Oxford, UK. 110-120.
- Moretti A ., 2014.** Introduction au genre *Fusarium* et son impact sur les cultures de céréales et la santé humaine. 1<sup>er</sup> Workshop international sur la fusariose des céréales en Algérie. INPV. [www.inpv.edu.dz](http://www.inpv.edu.dz)
- Moule C., 1971.** Phytotechnie spéciale. Tome II, Céréales. La Maison Rustique. Paris. France, 235 p.
- Moumene K., Bouakaz K., Oussaid Y., Oualid F., Derradji A., Chaabi H., Hasnaoui N., Daoudi R., Haddadi Y., Meddah D., Guedider N., Bellahouene N. & Tartoura M., 2014.** Problématique de la fusariose des céréales en Algérie : identification des espèces et leurs répartition dans les zones potentiellement céréalières. 1<sup>er</sup> Workshop international sur la fusariose des céréales en Algérie. INPV. [www.inpv.edu.dz](http://www.inpv.edu.dz)

\*N\*

- Nadeem S.M., Zahir Z.A., Naveed M., Arshad M. & Shahzad S.M., 2006.** Variation in growth and ion uptake of maize due to inoculation with plant growth promoting rhizobacteria under salt stress. *Soil & Environ.*, **25(2)**: 78-84.
- Nakkeeran S., Fernando W.G.D. & Siddiqui Z.A., 2005.** Plant growth promotin rhizobacteria formulations and its scope in commercialization for the management of pests and diseases. In Siddiqui Z.A. (ed.) PGPR: Biocontrol and Biofertilization. Springer. Dordrecht. The Netherlands, 313p.
- Newman M.A., Daniels M.J. & Dow J.M., 1995.** Lipopolysaccharide from *Xanthomonas campestris* induces defense-related gene expression in *Brassica campestris*. *Mol. Plant Microb. Interact.*, **8(5)**:778-780.

**Ngoma L., Babalola O.O. & Ahmad F., 2012.** Ecophysiology of plant growth promoting bacteria. *Scientific Research and Essays*, **7(47)**: 4003-4013.

**\*O\***

**Ongena M & Thonart P., 2006.** Resistance Induced in Plants by Non-pathogenic Microorganisms: Elicitation and Defense Responses. *In Floriculture, Ornamental and Plant*

Biotechnology: advances and topical issues. J.A. Teixeira da Silva (ed.). Global Science Books, Ltd. pp.: 447-463.

**Ongena M., Jourdan E., Adam A., Paquot M., Brans A., Joris B., Arpigny J.L. & Thonart P., 2007.** Surfactin and fengycin lipopeptides of *Bacillus subtilis* as elicitors of induced systemic resistance in plants. *Environmental Microbiology*, **9**: 1084-1090.

**\*P\***

**Pal K.K. & Gardener B.M.S., 2006.** Biological Control of Plant Pathogens. *The Plant Health Instructor*. DOI: 10.1094/PHI-A-2006-1117-02.

**Persello-Cartieaux F., Nussaume L. & Robaglia C., 2003.** Tales from the underground: molecular plant-rhizobacteria interactions. *Plant Cell Environ.*, **26(2)**: 189-199.

**Picard C., Baruffa E. & Bosco M., 2008.** Enrichment and diversity of plant-probiotic microorganisms in the rhizosphere of hybrid maize during four growth cycles. *Soil Biology and Biochemistry*, **40(1)**: 106-115

**Pieterse C.M.J., Van Pelt J.A., Ton J., Parchman S., Mueller M.J., Burchala A.J., Métraux J.P. & Van Loon L.C., 2000.** Rhizobacteria-mediated induced systemic resistance (ISR) in *Arabidopsis* requires sensitivity to jasmonate and ethylene but is not accompanied by an increase their production. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, **57**: 123-134.

**Pieterse C.M.J., Van Wees S.C.M., Ton J., Van Pelt J.A. & Van Loon L.C., 2002.** Signaling in rhizobacteria-induced systemic resistance in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Biol.*, **4(5)**: 535-544.

**Plouffe D. 2012.** Les modèles bioclimatiques utilisés en agriculture. Colloque en agroclimatologie, Canada, 12p.

**Podile A.R. & Kishore K., 2006** Plant growth-promoting rhizobacteria. *In Plant-associated bacteria*. Gnanamanickam S.S. (ed.). Springer, Dordrecht, Netherlands, pp.: 195-231.

**Porcel R., Zamarreño A.M., García-Mina J.M. & Aroca R., 2014.** Involvement of plant endogenous ABA in *Bacillus magaterium* PGPR activity in tomato plants. *BMC Plant Biology*. <http://www.biomedcentral.com/1471-2229/14/36>

Field Code Changed

**\*R\***

**Raaijmakers J.M., Vlami M. & De Souza J.T., 2002.** Antibiotic production by bacterial biocontrol agents. *Antonie van Leeuwenhoek*, **81(1-4)**:537-547.

**Ramamoorthy R., Viswanathan T., Raguchander T., Prakasam V. & Samiyappan R., 2001.** Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria in crop plants against pests and diseases. *Crop Protection*, **2**: 1-11.

**Rastoin J.L. & Benabderrazik E.H., 2014.** Céréales et oléoprotéagineux au Maghreb : Pour un co-développement de filières territorialisées. *Institut de Prospective Economique du Monde Méditerranéen*. 32p.

**Ravel J. & Cornelis P., 2003.** Genomics of pyoverdine mediated iron uptake in pseudomonads. *Trends Microbiol.*, **11**: 195-200.

**Reitz M., Oger P., Meyer A., Niehaus K., Farrand S. K., Hallmann J. & Sikora R.A., 2002.** Importance of the O-antigen core-region and lipid A of rhizobial lipopolysaccharides for the induction of systemic resistance in potato to *Globodera pallida*. *Nematology*, **4(1)**:73-79.

**Richardson A., Barea J.-M., McNeill A. & Prigent-Combaret C., 2009.** Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant Soil*, **321**: 305-339.

**Rodriguez H. & Fraga R., 1999.** Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnol. Adv.*, **17**: 319-339.

**Rodriguez H., Fraga R., Gonzalez T. & Bashan Y., 2006.** Genetic of Phosphate solubilization and its potential applications for improving plant growth promotion bacteria. *Plant Soil*, **287**: 15-21.

**Ryu C.M., Farag M.A., Hu C.H., Reddy M.S., Kloepper J.W. & Pare P.W., 2004.** Bacterial volatiles induce systemic resistance in Arabidopsis. *Plant Physiol.*, **134(3)**:1017-26.

**\*S\***

- Saha R., Saha N., Donofrio R.S. & Bestervelt L.L., 2012.** Microbial siderophores: a mini review. *J. Basic. Microbiol*, **52**: 1–15.
- Salisbury F.B., 1994.** The Role of Plant Hormones. In: Plant-Environment Interactions. Wilkinson, R.E. (ed.). Marcel Dekker, New York, USA, pp.: 39-81.
- Salvaila H., Lanthier-Bourbonnaisa P., Sobotab J.M., Cazac M, Benjamina J.M. & al., 2010.** A small RNA promotes siderophore production through transcriptional and metabolic remodeling. *PNAS*, **107(34)**:15223–15228.
- Sayoud R., Ezzahiri B. & Bouznad Z., 1999.** Les maladies des céréales et des légumineuses alimentaires au Maghreb. Guide pratique, 59 p.
- Shah S., Li J., Moffatt B.A. & Glick B.R., 1998.** Isolation and characterization of ACC deaminase genes from two different plant growth-promoting rhizobacteria. *Can. J. Microbiol.*, **44**: 833-843.
- Shamsuddin Z.H., Wahab Z., Marziah M. & Baset Mia M.A., 2010.** Effect of plant growth promoting rhizobacterial (PGPR) inoculation on growth and nitrogen incorporation of tissue-cultured *Musa* plantlets under nitrogen-free hydroponics condition. *AJCS*, **4(2)**:85-90.
- Sharma A. & Johri B.N., 2003.** Growth promoting influence of siderophore-producing *Pseudomonas* strains GRP3A and PRS9 in maize (*Zea mays* L.) under iron limiting conditions. *Microbiol. Res.* **158**: 243–248.
- Shedova E., Lipasova V., Velikodvorskaya G., Ovadis M., Chernin L. & Khmel I., 2008.** Phytase activity and its regulation in a rhizospheric strain of *Serratia plymuthica*. *Folia Microbiol.*, **53**: 110–114.
- Sikora R.A. & S. Hoffmann-Hergarten, 1993.** Biological control of plant parasitic nematodes with plant-health-promoting rhizobacteria. In: Lumsden R.D. & Vaughn J.L. (eds.) Pest management: biologically based technologies. Proceedings of Beltsville Symposium XVIII, *American Chemical Society*. Washington DC. pp: 166-172.
- Spaepen S., Vanderleyden J., Remans R., 2007.** Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signalling. *FEMS Microbiology Reviews*, **31 (4)**: 425-448.
- Stat FAO, 2013.** Production de blé.
- Steindler L., Bertani I., De Sordi L., Bigirimana J. & Venturi V., 2008.** The presence, type and role of N -acyl homoserine lactone quorum sensing in fluorescent *Pseudomonas*



originally isolated from rice rhizospheres are unpredictable. *FEMS Microbiol Lett.*, **288**: 102-111.

**\*T\***

**Ton J., Davison S., Van Wees S.C.M., Van Loon L.C. & Pieterse C.M.J., 2001.** The *Arabidopsis ISRI* locus controlling rhizobacteria-mediated induced systemic resistance is involved in ethylene signaling. *Plant Physiology*, **125**: 652-661.

**Trân Van V., Mavingui P., Berge O., Balandreau J. & Heulin T., 1994.** Promotion de croissance du riz inoculé par une bactérie fixatrice d'azote, *Burkholderia vietnamiensis*, isolée d'un sol sulfaté acide du Viêt-nam. *Agronomie*, **14**: 697-707

**Trân Van V., Berge O., Balandreau J., Ngô Ké S. & Heulin T., 1996.** Isolement et activité nitrogénasique de *Burkholderia vietnamiensis*, bactérie fixatrice d'azote associée au riz (*Oryza sativa* L.) cultivé sur un sol sulfaté du Viêt-nam. *Agronomie: Agriculture and environment*, **16**: 4479-491.

**\*V\***

**Van Loon L.C. & Bakker P.A.H.M., 2005.** Induced systemic resistance as a mechanism of disease suppression by rhizobacteria. In *PGPR: Biocontrol and Biofertilization*, edited by Z. A. Siddiqui: Springer, pp.:39-66.

**Van Loon L.C., 2007.** Plant responses to plant growth-promoting rhizobacteria. *Eur. J. Plant Pathol.*, **119**: 243-254.

**Van Rij E.T., Girard G., Lugtenberg B.J.J. & Bloemberg G.V., 2005.** Influence of fusaric acid on phenazine-1-carboxamide synthesis and gene expression of *Pseudomonas chlororaphis* strain PCL1391. *Microbiol.*, **151**: 2805-2814.

**\*W\***

*Références bibliographiques*

**Walker T.S., Bais H. P., Grotewold E. & Vivanco J.M., 2003.**Root exudation and rhizosphere biology. *Plant Physiol.*, **132**: 44-51.

**Walker M.V., 2010.**Impact de l'inoculation de micro-organismes phytobénéfiques sur le métabolisme secondaire de *Zea mays* L.Thèse de Doctorat .Université de Lyon,147p.

**\*Y\***

**Yan Z., Reddy A.S.N., Ryu C. M., McInroy J.A., Wilson M & Kloepper J.W., 2002.** Induced systemic protection against tomato late blight elicited by plant growth-promoting rhizobacteria.*Phytopathology*, **92**: 1329-1333.

**Yuen G.Y.& Schoneweis S.D., 2007.**Strategies for managing *Fusarium* head blight and deoxynivalenol accumulation in wheat. *International journal of Food Microbiology*, **119**: 126-130.

## *Annexes*

## Annexe I :

**Tableau 1 :** Caractéristiques et aspect des colonies bactériennes sélectionnées

Code	Caractéristiques de l'aspect des colonies
BCh11	Colonie à bord régulier, jaune foncé, semi bombée et brillante
BCh12	Colonie à bord régulier, rose, semi bombée et brillante
BCh13	Colonie à bord non régulier, beige, semi bombée, non brillante
BCh14	Colonie à bord régulier, jaune, bombée et brillante
BCh21	Colonie à bord régulier, blanchâtre, semi bombée et brillante
BCh22	Colonie à bord régulier, jaune, bombée et brillante
BCh23	Colonie à bord non régulier, rose, semi bombée et brillante
BCh24	Colonie à bord régulier, blanchâtre, bombée et brillante (aspect crémeux)
KCh11	Colonie à bord régulier, jaune, bombée et brillante
KCh12	Colonie à bord régulier, violette, relief plat
KCh13	Colonie à bord régulier, beige, semi bombée et brillante
KCh14	Colonie à bord régulier, crevette, relief plat et brillante
KCh15	Colonie à bord non régulier, jaune, relief plat et brillante
KCh21	Colonie à bord régulier, jaune, bombée et brillante
KCh22	Colonie à bord régulier, beige, bombée et brillante
KCh23	Colonie à bord régulier, blanchâtre, bombée et brillante
KCh24	Colonie à bord régulier, beige, semi bombée et brillante
KCh25	Colonie à bord régulier, rose, bombée et brillante
AO11	Colonie à bord régulier, blanchâtre, semi bombée et brillante (aspect crémeux)
AO21	Colonie à bord régulier, beige, bombée et brillante
AO22	Colonie à bord régulier, jaune, semi bombée et brillante
AO23	Colonie à bord non régulier, blanchâtre, semi bombée, surface rugueuse ?
AO24	Colonie à bord non régulier, violette, relief plat et non homogène
AO25	Colonie à bord régulier, orange, semi bombée et brillante
AO26	Colonie à bord régulier, beige foncé, bombée et brillante
AO27	Colonie à bord régulier, blanchâtre, semi bombée et brillante

## Annexe II. Analyse statistique

### 1. Effet de 22 souches bactériennes sur la germination d'une seule variété de blé dur

**Tableau 1. Effet sur le taux de germination des graines de blé**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
Souche	36,6610	22	1,6664	4,5065	0,000008	THS
Erreur	17,0098	46	0,3698			

**Tableau 2. Effet sur la longueur de coléoptiles**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
Souche	37814,5	22	1718,8	8,801	0,000000	THS
Erreur	8983,3	46	195,3			

### 2. Effet de trois souches rhizobactériennes sur la germination de cinq variétés de blé dur

**Tableau 3. Effet sur le taux de germination de cinq variétés de blé**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
Souche bactérienne	424,3	3	141,4	1,905	0,144310	NS
Variété	2584,7	4	646,2	8,703	0,000038	THS
Souche bactérienne*Variété	925,9	12	77,2	1,039	0,434047	NS

**Tableau 4. Effet sur la longueur de coléoptile de cinq variétés de blé**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
Souche bactérienne	0,6664	3	0,2221	1,732	0,175799	NS
Variété	9,1213	4	2,2803	17,78	0,000000	THS
Souche bactérienne*Variété	1,2971	12	0,1081	0,843	0,607654	NS
Erreur	5,1293	40	0,1282			

**3. Effet des trois souches rhizobactériennes sélectionnées sur la croissance de blé variété Massinissa cultivée en pots**

**Tableau 5. Effet sur l'émergence des plantules de blé**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
Souche bactérienne	267,5	3	89,2	1,981	0,136543	NS
Mode de plantation	2,5	1	2,5	0,056	0,815166	NS
Souche bactérienne*mode de plantation	87,5	3	29,2	0,648	0,589890	NS

**4.1 Effet sur les différents stades de développement des plantules de blé**

**Tableau 6. Le stade 03 feuilles**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
Souche bactérienne	5,10	3	1,70	4,25	0,012323	S
Mode de plantation	2,50	1	2,50	6,25	0,017738	S
Souche bactérienne*mode de plantation	2,70	3	0,90	2,25	0,101491	NS
Erreur	12,80	32	0,40			

**Tableau 7. Le stade 04 feuilles**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
Souche bactérienne	51,67	3	17,22	9,77	0,000100	THS
Mode de plantation	7,23	1	7,23	4,10	0,051314	NS
Souche bactérienne*mode de plantation	35,68	3	11,89	6,75	0,001180	HS
Erreur	56,40	32	1,76			

**Tableau 8. Le stade 05 feuilles**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
Souche bactérienne	98,50	3	32,83	14,43	0,000004	THS
Mode de plantation	32,40	1	32,40	14,24	0,000658	THS
Souche bactérienne*mode de plantation	37,80	3	12,60	5,54	0,003534	HS
Erreur	72,80	32	2,27			

**Tableau9. Le stade 06 feuilles**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
Souche bactérienne	816,08	3	272,03	80,90	0,000000	THS
Mode de plantation	9,03	1	9,03	2,68	0,111157	NS
Souche bactérienne*mode de plantation	29,08	3	9,69	2,88	0,051021	NS
Erreur	107,60	32	3,36			

**4. Effet sur le poids de matière sèche des différentes parties de la plante**

**Tableau 10. Effet sur le poids sec des racines des plantules de blé**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
Souche bactérienne	109250	3	36417	4,118	0,014077	S
Mode de plantation	12250	1	12250	1,385	0,247905	NS
Souche bactérienne*mode de plantation	20250	3	6750	0,763	0,523051	NS
Erreur	283000	32	8844			

**Tableau 11. Effet sur le poids sec des feuilles des plantules de blé**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
Souche bactérienne	424250	3	141417	5,750	0,002901	HS
Mode de plantation	100000	1	100000	4,066	0,052211	S
Souche bactérienne*mode de plantation	32500	3	10833	0,440	0,725616	NS
Erreur	787000	32	24594			

**Tableau 12. Effet sur le poids secs des plantules entières de blé**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
Souche bactérienne	938500	3	312833	8,370	0,000300	THS
Mode de plantation	182250	1	182250	4,876	0,034513	S
Souche bactérienne*mode de plantation	64250	3	21417	0,573	0,636891	NS
Erreur	1196000	32	37375			

## 6. Effet antagoniste des trois souches rhizobactériennes à l'égard de dix champignons phytopathogènes

**Tableau 13. Diamètre moyen des colonies fongiques sous l'effet des trois rhizobactéries**

<i>Source de variation</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Signification</i>
souche bactérienne	35,126	3	11,709	50,88	0,000000	THS
champignon phytopathogène	179,603	9	19,956	86,72	0,000000	THS
Souche bactérienne* champignon phytopathogène	37,173	27	1,377	5,98	0,000000	THS
Erreur	18,410	80	0,230			



## Annexe III : Fiche descriptive des 5 variétés de blé dur

### Chen's

**Origine :** Syrie

**Pédigrée :** Shwa'S'/Bit 'S'CD 26406-3B-2Y-9Y-OM-3Y-OB

#### Caractérisation au champ

- ✚ Coléoptile
  - Pigmentation anthocyanique : Nulle ou très faible
  
- ✚ Première feuille
  - Pigmentation anthocyanique Nulle ou très faible
- ✚ Plante
  - Port au tallage: Dressé
  - Fréquence des plantes ayant la dernière feuille retombante : Nulle ou très faible
  - Hauteur (tige, épi et barbes) Courte
  
- ✚ Dernière Feuille:
  - Glaucescence de la gaine Forte
  - Glaucescence du limbe Faible
- ✚ Epoque d'épiaison (1er épillet visible sur 50% des plantes) : Précoce
  
- ✚ Barbes
  - Pigmentation anthocyanique Nulle ou très faible
  - Couleur : Noire
- ✚ Tige
  - Pilosité du dernier nœud : Nulle ou très faible
  - Glaucescence du col de l'épi : Moyenne
- ✚ Epi
  - Glaucescence : Moyenne

#### Caractérisation sur épi sec

- ✚ Barbes
  - Distribution des barbes : Sur toute la longueur
  - Longueur par rapport à l'épi : Plus longues
- ✚ Epi
  - Longueur à l'exclusion des barbes : Moyen
  - Pilosité du bord du 1<sup>er</sup> article du rachis : Nulle ou très faible
  - Couleur (à maturité) : Blanc
  - Forme en vue de profil : Pyramidale
  - Compacité : Compact
  
- ✚ Paille
  - Moelle en section transversale : Peu épaisse

✚ Glume inférieure

- Forme de la glume : Ovoïde
- Forme de la troncature : Echancrée
- Largeur de la troncature : Etroite
- Longueur du bec : Court
- Forme du bec : Droit
- Pilosité de la face externe : Présente

✚ Grain

- Forme : Demi-allongé
- Longueur des poils de la brosse vue dorsale : Courts
- Coloration au phénol : Faible

✚ Type de développement : Hiver

**Caractéristiques Agronomiques et technologiques:**

- ✚ Rendement : Elevé
- ✚ Poids de mille grains(PMG) : Elevé
- ✚ Qualité semoulière : \*
- ✚ Mitadinage : \*
- ✚ Teneur en protéines : \*

**Résistance aux maladies :**

- ✚ Oïdium sur feuille : \*
- ✚ Oïdium sur épi : \*
- ✚ Rouille brune: \*
- ✚ Charbon : \*
- ✚ Fusariose : \*
- ✚ Septoriose : \*

## GTA Dur

**Origine :** Mexique

**Pédigrée :** Gaviota x Durum

### Caractérisation au champ

✚ Coléoptile

- Pigmentation anthocyanique : Nulle ou très faible

✚ Première feuille

- Pigmentation anthocyanique : Nulle ou très faible

✚ Plante

- Port au tallage: Demi-dressé
- Fréquence des plantes ayant la dernière feuille retombante : Faible
- Hauteur (tige, épi et barbes) : Faible

✚ Dernière Feuille:

- Glaucescence de la gaine : Moyenne
- Glaucescence du limbe : Faible

✚	Epoque d'épiaison (1er épillet visible sur 50% des plantes) :	Précoce
✚	Barbes	
	• Pigmentation anthocyanique :	Nulle ou très faible
	• Couleur :	Noire
✚	Tige	
	• Pilosité du dernier nœud :	Nulle ou très faible
	• Glaucescence du col de l'épi :	Moyenne
✚	Epi	
	• Glaucescence :	Faible

#### Caractérisation sur épi sec

✚	Barbes	
	• Distribution des barbes :	Sur toute la longueur
	• Longueur par rapport à l'épi :	Plus longues
✚	Epi	
	• Longueur à l'exclusion des barbes :	Moyen
	• Pilosité du bord du 1 <sup>er</sup> article du rachis :	Moyenne
	• Couleur (à maturité) :	Blanc
	• Forme en vue de profil :	Pyramidale
	• Compacité :	Demi lâche à demi-compact
✚	Paille	
	• Moelle en section transversale	Peu épaisse
✚	Glume inférieure	
	• Forme de la glume :	Allongée
	• Forme de la troncature :	Echancrée
	• Largeur de la troncature :	Moyenne
	• Longueur du bec :	Moyen
	• Forme du bec :	légèrement coudé
	• Pilosité de la face externe :	Présente
✚	Grain	
	• Forme :	Allongé
	• Longueur des poils de la brosse vue dorsale :	Courts
	• Coloration au phénol :	Moyenne

✚	Type de développement :	Hiver
---	-------------------------	-------

#### Caractéristiques Agronomiques et technologiques:

✚	Rendement :	Elevé
✚	Poids de mille grains(PMG) :	Elevé
✚	Qualité semoulière :	*
✚	Mitadinage :	*

Teneur en protéines : \*

#### Résistance aux maladies :

✚ Oïdium sur feuille :	Résistante
✚ Oïdium sur épi :	Résistante
✚ Rouille brune :	Tolérante
✚ Charbon :	*
✚ Fusariose :	*
✚ Septoriose :	Résistante

## Massinissa

**Origine :**Algérie

**Pédigrée :**97-98/002-2S-2S-3S-1S-0S

**Obtenteur :**ITGC Sétif

### Caractérisation au champ

✚ Coléoptile	
• Pigmentation anthocyanique :	Nulle ou très faible
✚ Première feuille	
• Pigmentation anthocyanique	Nulle ou très faible
✚ Plante	
• Port au tallage:Demi-dressé	
• Fréquence des plantes ayant la dernière feuille retombante :	Faible
• Hauteur (tige, épi et barbes) :	Moyenne
✚ Dernière Feuille:	
• Glaucescence de la gaine :	Nulle ou très faible
• Glaucescence du limbe :	Nulle ou très faible
✚ Epoque d'épiaison (1er épillet visible sur 50% des plantes) :	Moyenne
✚ Barbes	
• Pigmentation anthocyanique :	Nulle ou très faible
✚ Tige	
• Pilosité du dernier nœud :	Faible
• Glaucescence du col de l'épi :	Nulle ou très faible
✚ Epi	
• Glaucescence :	Nulle ou très faible

### Caractérisation sur épi sec

✚ Barbes	
• Distribution des barbes :	Sur toute la longueur
• Longueur par rapport à l'épi :	Plus longues
✚ Epi	
• Longueur à l'exclusion des barbes :	Moyen
• Pilosité du bords du 1 <sup>er</sup> article du rachis :	Forte
• Couleur (à maturité) :	Blanc
• Forme en vue de profil :	Fusiforme
• Compacité :	Demi-lâche à demi-compact

✚ Glume inférieure

- Forme de la glume : Allongée
- Forme de la troncature : Echancrée
- Largeur de la troncature : Etroite
- Longueur du bec : Court
- Forme du bec : Droit
- Pilosité de la face externe : Absente

✚ Grain

- Forme : Ovoïde
- Longueur des poils de la brosse vue dorsale : Courts
- Coloration au phénol : Nulle ou très faible

✚ Type de développement : Hiver

**Caractéristiques Agronomiques et technologiques:**

- ✚ Rendement : Elevé
- ✚ Poids de mille grains(PMG) : Elevé
- ✚ Qualité semoulière : Bonne
- ✚ Mitadinage : Résistante
- ✚ Teneur en protéines : 15,87%

**Résistance aux maladies :**

- ✚ Oïdium sur feuille :Faiblement sensible
- ✚ Oïdium sur épi : Faiblement sensible
- ✚ Rouille brune:Faiblement sensible
- ✚ Charbon : Résistante
- ✚ Fusariose : Résistante
- ✚ Septoriose : Résistante

**Manssoura**

**Origine :**Algérie

**Pédigrée :**ITGC 6 SET 697/98/004-1S-4S-2S-1S-0S

**Obtenteur :** ITGC Khroub

**Caractérisation au champ**

- ✚ Coléoptile
  - Pigmentation anthocyanique : Nulle ou très faible
- ✚ Première feuille
  - Pigmentation anthocyanique : Faible
- ✚ Plante
  - Port au tallage:Demi-dressé
  - Fréquence des plantes ayant la dernière feuille retombante : Faible
  - Hauteur (tige, épi et barbes) : Longue
- ✚ Dernière Feuille:
  - Glaucescence de la gaine : Forte
  - Glaucescence du limbe : Faible
- ✚ Epoque d'épiaison (1er épillet visible sur 50% des plantes) : Moyenne

- ✚ Barbes
  - Pigmentation anthocyanique : Nulle ou très faible
  - Couleur : Brun pâle

✚ Tige

- Pilosité du dernier nœud : Forte
- Glaucescence du col de l'épi : Faible

✚ Epi

- Glaucescence : Faible

**Caractérisation sur épi sec**

✚ Barbes

- Distribution des barbes : Sur toute la longueur
- Longueur par rapport à l'épi : Plus longues

✚ Epi

- Longueur à l'exclusion des barbes : Court
- Pilosité du bord du 1<sup>er</sup> article du rachis : Forte
- Couleur (à maturité) : Faiblement coloré
- Forme en vue de profil : Pyramidale
- Compacité : Demi-lâche à demi-compact

✚ Paille

- Moelle en section transversale : Peu épaisse

✚ Glume inférieure

- Forme de la glume : Allongée
- Forme de la troncature : Echancrée avec présence d'un 2<sup>ème</sup> bec
- Largeur de la troncature : Moyenne
- Longueur du bec : Court
- Forme du bec : droit
- Pilosité de la face externe : Présente

✚ Grain

- Forme : Ovoïde
- Longueur des poils de la brosse vue dorsale : Courts
- Coloration au phénol : Faible

✚ Type de développement :

Hiver

**Caractéristiques Agronomiques et technologiques:**

- ✚ Rendement : Elevé
- ✚ Poids de mille grains(PMG) : Elevé
- ✚ Qualité semoulière : Bonne
- ✚ Mitadinage : Faiblement sensible
- ✚ Teneur en protéines : 14,77%

**Résistance aux maladies :**

- ✚ Oïdium sur feuille : Faiblement sensible
- ✚ Oïdium sur épi : Faiblement sensible

✚ Rouille brune:	Faiblement sensible
✚ Charbon :	*
✚ Fusariose :	*
✚ Septoriose :	Résistante

## Meghres

**Origine :**Algérie

**Pédigrée :**023-99-ITGC SETIF/1S-8S-1S-1S-0S

**Obtenteur :** ITGC Sétif

### Caractérisation au champ

✚ Coléoptile	
• Pigmentation anthocyanique :	Nulle ou très faible
✚ Première feuille	
• Pigmentation anthocyanique :	Nulle ou très faible
✚ Plante	
• Port au tallage: Dressé	
• Fréquence des plantes ayant la dernière feuille retombante :	Faible
• Hauteur (tige, épi et barbes) :	Longue
✚ Dernière Feuille:	
• Glaucescence de la gaine :	Forte
• Glaucescence du limbe :	Forte
✚ Epoque d'épiaison (1er épillet visible sur 50% des plantes) :	Tardive
✚ Barbes	
• Pigmentation anthocyanique :	Nulle ou très faible
• Couleur :	Noire
✚ Tige	
• Pilosité du dernier nœud :	Nulle ou très faible
• Glaucescence du col de l'épi :	Forte
✚ Epi	
• Glaucescence :	Moyenne

### Caractérisation sur épi sec

✚ Barbes	
• Distribution des barbes :	Sur toute la longueur
• Longueur par rapport à l'épi :	Plus longues
✚ Epi	
• Longueur à l'exclusion des barbes :	Long
• Pilosité du bord du 1 <sup>er</sup> article du rachis :	Nulle ou très faible
• Couleur (à maturité) :	Faiblement coloré
• Forme en vue de profil :	Pyramidale
• Compacité :	Demi lâche à demi-compact

- ✚ Paille
  - Moelle en section transversale : Peu épaisse
- ✚ Glume inférieure
  - Forme de la glume : Allongée
  - Forme de la troncature : Echancrée
  - Largeur de la troncature : Moyenne
  - Longueur du bec : Moyen
  - Forme du bec : Droit
  - Pilosité de la face externe : Présente

- ✚ Grain
  - Forme : Demi-allongé
  - Longueur des poils de la brosse vue dorsale : Courts
  - Coloration au phénol : Faible
- ✚ Type de développement : Hiver

#### Caractéristiques Agronomiques et technologiques:

- ✚ Rendement : Elevé
- ✚ Poids de mille grains(PMG) : Elevé
- ✚ Qualité semoulière : Bonne
- ✚ Mitadinage : Résistante
- ✚ Teneur en protéines : 14,76%

#### Résistance aux maladies :

- ✚ Oïdium sur feuille : Résistante
- ✚ Oïdium sur épi : Résistante
- ✚ Rouille brune: Résistante
- ✚ Charbon : Résistante
- ✚ Fusariose : Résistante
- ✚ Septoriose : Résistant



## Annexe IV : Echelle de Zadock

### Germination

- 00 Semence sèche
- 01 Début de l'imbibition d'eau
- 03 Imbibition complète
- 05 Émergence de la radicule de la semence
- 07 Émergence du coléoptile de la semence
- 09 Feuille au sommet du coléoptile

### Croissance de la plantule

- 10 premières feuilles émergées
- 11 premières feuilles déroulées
- 12 2 feuilles déroulées
- 13 3 feuilles déroulées
- 14 4 feuilles déroulées
- 15 5 feuilles déroulées
- 16 6 feuilles déroulées
- 17 7 feuilles déroulées
- 18 8 feuilles déroulées
- 19 9 feuilles ou plus déroulées

### Tallage

- 20 Tige principale seulement
- 21 Tige principale et 1 talle
- 22 Tige principale et 2 talles
- 23 Tige principale et 3 talles
- 24 Tige principale et 4 talles
- 25 Tige principale et 5 talles
- 26 Tige principale et 6 talles
- 27 Tige principale et 7 talles
- 28 Tige principale et 8 talles
- 29 Tige principale et 9 talles ou plus

### Élongation des tiges

- 30 Tige en pseudo érection
- 31 1<sup>er</sup> noeud perceptible
- 32 2<sup>ème</sup> noeuds perceptible
- 33 3<sup>èmes</sup> noeud perceptible
- 34 4<sup>èmes</sup> noeud perceptible
- 35 5<sup>èmes</sup> noeud perceptible
- 36 6<sup>èmes</sup> noeud perceptible
- 37 Feuille étendard à peine visible
- 39 Ligule/col de la feuille étendard à peine visible

### Gonflement

- 40 - - - - -
- 41 La gaine de la feuille étendard prend de l'expansion
- 45 Gonflement évident de la gaine
- 47 La gaine de la feuille étendard s'ouvre
- 49 Les premières barbes sont visibles

### Épiaison (Émergence de l'inflorescence)

- 50 Premier épillet de l'épi est visible
- 53 1/4 de l'épi est émergé
- 55 1/2 de l'épi est émergé
- 57 3/4 de l'épi est émergé
- 59 Émergence complète de l'épi

### Pollinisation (Anthésis)

- 60 Début de la pollinisation
- 65 Pollinisation à moitié complétée
- 69 Pollinisation complète

### Développement laiteux

- 70 - - - - -
- 71 Grain liquide
- 73 Début du stade laiteux
- 75 Milieu du stade laiteux

- 77 Stade laiteux tardif

### Développement pâteux

- 80 - - - - -
- 83 Début du stade pâteux
- 85 Stade pâteux tendre
- 87 Stade pâteux dur

### Maturation

- 90 - - - - -
- 91 Grain dur (difficile à séparer avec l'ongle)
- 92 Grain dur
- 93 Le grain se détache facilement
- 94 Trop mature, la paille est morte et s'affaisse
- 95 La semence est dormante
- 96 50 % de la semence viable germe
- 97 La semence n'est pas dormante
- 98 Dormance secondaire
- 99 Perte de la dormance seconda

**Annexe V : Température maximale, minimale et moyenne**

<b>Somme des températures pour la culture de blé dur variété <i>Massinissa</i> depuis le semis jusqu'à la fin de l'essai</b>				
<b>Jours</b>	<b>Minima(T°C)</b>	<b>Maxima(T°C)</b>	<b>Moyenne(T°C)</b>	<b>Somme des températures</b>
12/07/2012	24,80	28,40	26,6	26,6
13/07/2012	24,60	28,20	26,4	53
14/07/2012	26,70	35,10	30,9	83,9
15/07/2012	28,80	29,50	29,15	113,05
16/07/2012	24,00	25,60	24,8	137,85
17/07/2012	21,80	28,50	25,15	163
18/07/2012	22,00	26,20	24,1	187,1
19/07/2012	22,80	27,20	25	212,1
20/07/2012	23,20	29,60	26,4	238,5
21/07/2012	22,80	27,30	25,05	263,55
22/07/2012	23,30	25,50	24,4	287,95
23/07/2012	22,80	27,00	24,9	312,85
24/07/2012	21,80	27,00	24,4	337,25
25/07/2012	21,80	27,70	24,75	362
26/07/2012	22,40	29,20	25,8	387,8
27/07/2012	25,00	30,00	27,5	415,3
28/07/2012	24,50	30,60	27,55	442,85
29/07/2012	22,50	27,50	25	467,85
30/07/2012	24,00	27,70	25,85	493,7
31/07/2012	24,20	28,10	26,15	519,85
01/08/2012	23,50	31,20	27,35	547,2
02/08/2012	24,20	35,20	29,7	576,9
03/08/2012	25,00	28,80	26,9	603,8
04/08/2012	25,00	28,70	26,85	630,65
05/08/2012	25,80	32,60	29,2	659,85
06/08/2012	24,30	31,80	28,05	687,9
07/08/2012	24,70	28,80	26,75	714,65
08/08/2012	25,80	35,80	30,8	745,45
09/08/2012	24,40	32,20	28,3	773,75
10/08/2012	25,60	37,50	31,55	805,3
11/08/2012	26,00	30,60	28,3	833,6
12/08/2012	26,80	37,40	32,1	865,7
13/08/2012	27,50	34,60	31,05	896,75
14/08/2012	24,10	31,00	27,55	924,3
15/08/2012	25,80	34,20	30	954,3
16/08/2012	24,50	32,80	28,65	982,95
17/08/2012	26,20	31,00	28,6	1011,55
18/08/2012	26,00	32,00	29	1040,55
19/08/2012	25,60	31,20	28,4	1068,95
20/08/2012	25,80	29,40	27,6	1096,55
21/08/2012	26,10	32,30	29,2	1125,75
22/08/2012	24,90	34,00	29,45	1155,2
23/08/2012	26,10	35,20	30,65	1185,85

24/08/2012	26,30	33,90	30,1	1215,95
25/08/2012	29,00	35,00	32	1247,95
26/08/2012	25,10	29,80	27,45	1275,4
27/08/2012	25,70	28,20	26,95	1302,35
28/08/2012	25,20	31,00	28,1	1330,45
29/08/2012	26,20	34,00	30,1	1360,55
30/08/2012	25,80	34,90	30,35	1390,9
31/08/2012	24,50	27,00	25,75	1416,65
01/09/2012	22,30	25,70	24	1440,65
02/09/2012	19,80	23,00	21,4	1462,05
03/09/2012	20,10	24,60	22,35	1484,4
04/09/2012	19,90	24,00	21,95	1506,35
05/09/2012	21,80	25,40	23,6	1529,95
06/09/2012	21,50	26,00	23,75	1553,7
07/09/2012	21,60	25,40	23,5	1577,2
Total	1577.2°C			

## Résumé

L'évaluation du potentiel phyto-stimulateur ou inhibiteur d'une collection de 22 souches rhizobactériennes isolées à partir de la rhizosphère de blé dans 3 sites de la Wilaya de Bouira, a permis de sélectionner 19 souches (soit 86%) comme inhibitrices de la germination des graines et/ou de l'élongation du coléoptile des graines germées. Par contre, trois souches rhizobactériennes codées AO21, AO24 et AO26 ont montré une légère stimulation de la croissance des plants de blé lors des tests *in vitro*. Les résultats de l'inoculation en pots avec deux modes d'application : l'enrobage de la semence et la suspension bactérienne en comparaison avec les témoins non inoculés (évolution des différents étages foliaires, état sanitaires, poids sec total...etc) ont été significatifs et laissent supposer que les résultats obtenus sont dus à une bio-protection conférée par les bactéries antagonistes et non pas par un effet stimulateur de la croissance. Une nette réduction de la croissance mycélienne est entraînée par les 3 souches antagonistes contre *Fusarium solani*, *Fusarium verticillioides*, *Fusarium graminearum*, *F. lateritium* et *F. moniliforme*. La mise en culture duelle des trois rhizobactéries avec des bactéries phytopathogènes du blé a mis en évidence une zone d'inhibition allant de 2 à 7 mm, indiquant la production probable de substances diffusibles dans le milieu par les souches AO26 et AO21 efficaces contre les bactéries phytopathogènes du genre *Pseudomonas* codées ZK et 4K.

**Mots clés :** Rhizosphère, blé, souches rhizobactériennes, enrobage de la semence, suspension bactérienne, antagoniste, bactéries phytopathogènes, phyto-stimulation.

## Abstract

Evaluation of phyto-stimulatory or inhibitory potential of a collection of 22 strains isolated rhizobactériennes from the rhizosphere of wheat in three sites in the Wilaya of Bouira, helped select 19 strains (86%) as inhibitors of seed germination and / or coleoptile elongation of sprouts. As against three strains encoded rhizobactériennes AO21, AO24 and AO26 showed a slight stimulation of the growth of wheat plants during *in vitro* tests. The results of the inoculation in pots with two modes of application: coating the seed and the bacterial suspension in comparison with non-inoculated controls (Evolution of leaves, health state total dry weight ...) are significant and suggest that the results obtained are of a bio-protection conferred by antagonistic bacteria and not by a stimulatory effect of growth. A net reduction of mycelial growth is driven by three antagonistic strains against *Fusarium solani*, *Fusarium verticillioides*, *Fusarium graminearum*, *F. moniliforme* and *F. landiniceanum*. The setting of the three dual cultivation with rhizobacteria phytopathogenic bacteria showed an inhibition zone of 2 to 7 mm, indicating the probable production of diffusible substances in the medium by strains AO26 and AO21 effective against phytopathogenic bacteria encoded ZK and 4K.

**Key words:** Rhizosphere, wheat, rhizobactériennes antagonist strains, seed coating, bacterial suspension, plant pathogenic bacteria, phyto-stimulation.

## ملخص

ساعد تقييم 22 سلالة بكتيرية معزولة من منطقة ريزوسفير القمح أثناء اختبارات المخبر تم أخذها من ثلاث مواقع من ولاية البويرة على تحديد تسعة عشر (19) سلالة مثبثة لإنبات البذور والكوليبيتيل (استطالة البراعم) بنسبة 86%، وثلاث (03) سلالات ذات تحفيز طفيف لنمو نبات القمح، تم تشفيرها كالتالي: AO24-AO21- AO26.

بالنسبة للنتائج المتحصل عليها في اختبارات الأواني، اعتمدنا على نوعين من وسائط التطبيق: الأول طلاء البذور والثاني محلول من البكتيريا وقارناها بالشاهد، حيث اعتمدنا على ملاحظة تطور نبات القمح من حيث: تطور الأوراق، الحالة الصحية للنبات، الوزن الجاف للنبات، وتوصلنا إلى نتائج هامة: وهي أن الحماية التي تمنحها بكتيريا ريزوسفير ليس لها علاقة بتنشيط وتحفيز نمو نبات القمح هذا من جهة. ومن جهة أخرى بالنسبة لاختبارات الثلاث سلالات من بكتيريا ريزوسفير ضد سلالات عدائية من الفطريات التي تصيب نبات القمح، فقد أظهرت النتائج انخفاض ملحوظ في نمو 05 سلالات من الفطر: *Fusarium solani*, *Fusarium verticillioides*, *F. graminearum*, *F. lateritium* و *F. moniliforme*.

أما بالنسبة لنتائج الزراعة المزدوجة لثلاث أنواع من البكتيريا المشفرة ضد بكتيريا ممرضة للنبات، فقد بينت ظهور منطقة تثبيط من 02 إلى 07 ملم، مما يدل على إفراز محتمل لمواد ذات فعالية ضد البكتيريا الممرضة للنبات والمشفرة ZK و 4K.

كلمات المفتاح: ريزوسفير، القمح، بكتيريا الريزوسفير، سلالات عدائية، طلاء البذور، محلول بكتيريا، بكتيريا مسببة للأمراض النباتية، تحفيز النمو.