



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج
Université Mohamed El Bachir El Ibrahimy B.B.A.
كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الارض والكون
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers
قسم العلوم الفلاحية
Département des Sciences agronomique



Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Science agronomique

Spécialité : Protection des végétaux

Thème :

Rôle des PGPR dans la promotion de la croissance de la culture de blé dur et la lutte contre les microorganismes nuisibles qui lui sont associés.

Présenté par : Sekhara Fawzi
Sai Abdel Ali

Soutenu le : 18 / 09 / 2022 Devant le jury :

Nom, Prénom	Grade	Affiliation
Président : M ^r BOUZID CHAWKI	MCA	Faculté SNV-STU, Univ. Bordj Bou Arreridj
Encadrant : M ^r MESSAOUDI HANANE	MAA	Faculté SNV-STU, Univ. Bordj Bou Arreridj
Examineur : M ^r MOUTASSEM DAHOU	MCA	Faculté SNV-STU, Univ. Bordj Bou Arreridj

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous rendons avant toute chose grâce à dieu le tout puissant et le miséricordieux.

Nos remerciements les plus chaleureux au notre encadrant MESSAOUDI HANANE MAA (Université de BBA) pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable et par sa disponibilité, et ses conseils qui nous ont permis de réaliser ce travail.

Nos sincères remerciements s'adressent aussi à BOUZID CHAWKI (Université de BBA) de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Nous exprimons nos vifs remerciements à MOUTASSEM DAHOU MCA (Université de BBA) d'avoir accepté d'examiner ce travail et d'être parmi le jury.

Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui, de près ou de loin ont participé à la rédaction de ce mémoire.

Je dédie ce modeste travail

*À Mes Chers Parents Je vous remercie pour tout votre soutien
tout au long de mes études.*

*À mon épouse que je la remercie sincèrement de m'avoir soutenu
tout au long de mon parcours
Académique.*

À mes chers enfants Ritel, Monçef et Roya

À tous mes frères, mes collègues et amis.

À tous mes professeurs.

mon partenaire de recherche

Fouzi

Je dédie cet humble travail

A la mémoire de celui qui a toujours illuminé mon chemin, mon cher père et ma mère qu'aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour et la considération que j'ai toujours envers elle pour tous les efforts fournis pour mon éducation et mon bien être, que Dieu lui préserve et t'accorde santé et longue vie.

Abdel Ali

Résumer	
Abstract	
المخلص	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Listes des abréviations	
Introduction	1
Chapitre I : Généralité sur les céréales	
1.1. Céréaliculture	3
1.2. Historique de céréaliculture	3
1.3. Importance et utilisation des céréales	4
2. Céréales cultivées	4
2.1. Le blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.)	4
2.2. Classification botanique	5
2.3. Systématique de blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.)	5
2.4. Composition chimique des grains de blé	5
3. Blé en Algérie	6
3.1. Production, Consommation et Importation	6
4. Contraintes de la production de blé	7
4.1. Les contraintes abiotiques	7
4.2. Les contraintes biotiques	7
4.2.1. Les maladies cryptogamiques du blé dur	7
4.2.2. Les adventices du blé dur	10
4.2.3. Les bactéries, les virus, les némathodes et autres ravageurs	11
4.3. Contraintes agronomiques	11
5. Utilisation des engrais et de produits phytosanitaires	11
5.1. Utilisation des engrais	11
5.2. Apport de produits phytosanitaires	12
5.3 Effets des pesticides sur l'environnement	12
6. Amélioration de la production des céréales par les microorganismes	13
Chapitre II : Données sur les PGPR et leur mode d'action	
II.1. Définition de la rhizosphère	14
II.2. Rôle de la rhizosphère	15
II.3. les rhizobactéries de la rhizosphère	15
II.4. Les rhizobactéries stimulatrices de la croissance végétale (PGPR)	17
II.5. Les effets bénéfiques des PGPR	18
II.5.1. Effets phytostimulateurs des bactéries PGPR	18
II.5.1.1. Augmentation de la qualité de nutriment disponible	18
a) Fixation libre de l'azote	18
b) Solubilisation du phosphate	21
II.5.1.2. Amélioration de la micro-structure du sol rhizosphérique	22
Production d'Exo-polysaccharides	22
II.5.1.2. Modification de l'équilibre hormonal de la plante	
(production de phytohormone)	23
a) Thidiazuron (Cytokinines)	23
b) Acide Indole-3-acétique (AIA)	24
c) Ethylène et 1-Amino-cycloprane-1-carbone (ACC) désaminase	25

II.5.2. Effets phytoprotecteurs des bactéries PGPR	26
II.5.2.1. Résistance systémique induite	26
II.5.2.2. Induction d'une résistance systémique acquise (SAR) chez les plantes	26
II.5.2.3. Compétition trophique et spatiale	28
II.5.2.4. Production des antibiotiques	29
II.5.2.5. Production des enzymes lytiques	30

Chapitre III: Utilisation des PGPR en agriculture

III.1. l'usage des PGPR en agriculture	31
III.2. Formulation	31
III.2.1. Utilisation des PGPR en formulation de biofertilisants	32
III.2.1.1. Quelques rhizobactéries utilisées comme biofertilisant	33
III.2.2. Utilisation des PGPR en formulation de biopesticides	34
III.3. Des limites à l'usage de PGPR	34
III.4. Commercialisation des biofertilisants	35

Conclusion et perspectives

Conclusion	37
références bibliographique	38

Résumé

Les bactéries antagonistes contribuent à la gestion des maladies des plantes en stimulant les défenses naturelles chez l'hôte et/ou en assurant le bio contrôle direct des bio agresseurs, Certaines bactéries provenant du sol sont reconnues pour posséder certaines caractéristiques bénéfiques pour les plantes tant au niveau du contrôle des pathogènes qu'au niveau de l'augmentation de croissance. Les PGPR peuvent influencer la croissance des plantes de façon directe ou indirecte. Elles sont également très intéressantes pour l'utilisation dans l'agriculture comme biofertilisants, biopesticides et dans la bioremédiation.

Mots clés : Rhizosphère, blé, souches rhizobactériennes, antagoniste, bactéries phytopathogènes, phyto-stimulation.

Summary

Antagonistic bacteria contribute to the management of plant diseases by stimulating the host's natural defenses and/or by ensuring the direct biocontrol of bioaggressors, Certain bacteria from the soil are known to possess certain beneficial characteristics for plants both at the level of pathogen control than at the level of growth enhancement. PGPRs can influence plant growth either directly or indirectly. They are also very interesting for use in agriculture as biofertilizers, biopesticides and in bioremediation.

Key words: Rhizosphere, wheat, rhizobacterial strains, antagonist, phytopathogenic

ملخص

تساهم البكتيريا المعادية في إدارة أمراض النبات من خلال تحفيز الدفاعات الطبيعية للمضيف و / أو من خلال توفير المكافحة الحيوية المباشرة للمضادات الحيوية. تعزيز النمو. يمكن أن تؤثر PGPRs على نمو النبات إما بشكل مباشر أو غير مباشر. كما أنها مفيدة جدًا لاستخدامها في الزراعة كأسمدة حيوية ومبيدات آفات حيوية وفي المعالجة الحيوية.

كلمات المفتاح : ريزوسفير، القمح، بكتيريا الريزوسفير، سالالت عذائية، ، محلول بكتيريا، بكتيريا مسببة للأمراض النباتية، .
تحفيز النمو

Liste des abréviations

PGPR	Plant Growth Promoting Rhizobacteria
AIA	Acide indole 3-acétique
ISR	Résistance Systémique Induite
N	Azote
P	Phosphore
K	Potassium
ACC	l'acide 1-aminocyclopropane carboxylique
EPS	Exo-polysaccharides
CK	Cytokinine
LPS	Lipopolysaccharide
RSA	Résistance systémique acquise
PTI	PAMP-triggered immunity
ETS	Effector-Triggered Susceptibility
ETI	Effector-triggered immunity
Avr	Gène d'avirulence
HR	Hypersensibilité
ADE	Autorisation de Distribution pour Expérimentation
GB	Gibbérelline
DAP	Di-Ammonium Phosphate

liste des figure:

Figure1: Schéma de la rhizosphère	14
Figure 02: Représentation schématique des interactions mutualistes entre la plante (autotrophe) et les microorganismes (hétérotrophes) et entre les microorganismes eux-mêmes au sein de la rhizosphère.	15
Figure 3 : Modes d'action des rhizobactéries bénéfiques, qui conduisent à des effets de phytostimulation ou de phytoprotection du blé	19
Figure 04. Contribution des microorganismes à la nutrition des plantes en P	22
Figure 5 : Biosynthèse des cytokines	24
Figure 06: Schéma expliquant l'effet d'une bactérie PGPR sur la diminution de la concentration d'éthylène chez une graine ou une racine	25

Listes des tableaux :

Tableau 01: Composition chimique de 100g de graines mûres et crues de blé dur	6
Tableau 02: Les principales maladies fongiques affectant la production du blé.	8
Tableau 03: Les adventices du blé dur	10
Tableau 04: Les bacteries, les virus, les nematodes et autres ravageurs du blé en Algérie	10
Tableau05 : Les termes adoptés pour la classification des mécanismes par les quels les PGPR stimulant la croissance des plantes	18
Tableau 06 : effet de l'utilisation des rhizobactéries	33
Tableau 07 : Liste de quelques inoculants utilisant des microorganismes PGPR, commercialisés dans le monde	36

Introduction

Le blé, le riz et le maïs sont les céréales les plus importantes dans le monde entier. Le blé est cultivé largement dans le monde sous des conditions climatiques diverses et a été la denrée alimentaire de base pour la plupart des civilisations. Il joue un rôle essentiel dans l'alimentation directe et également indirecte d'une très large fraction de l'humanité (**Charvet ,1977**).

Le blé fournit plus de calories et de protéines dans le régime que n'importe quelle autre céréale (**Susana et al., 2008**).

Dans le monde la production de blé est d'environ 2523 millions de tonnes (**FAO, 2014**).

Sa culture est surtout localisée dans le bassin méditerranéen d'une part (Europe du Sud, Moyen orient, Afrique du Nord), et en Amérique du Nord d'autre part (Canada central et Nord des USA), où est produit le quart du blé dur mondial (**Clerget, 2011**).

En Algérie, Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est la première céréale cultivée, il occupe environ 2 millions d'hectares (**Susana et al., 2008**). Selon les estimations du Conseil International des Céréales, les importations de blé dur ont approché les 1,6 millions de tonnes en 2015.

La plupart des travaux de recherche effectués sur le blé dur ont eu durant de nombreuses années pour objectif principal l'augmentation de la productivité, une approche basée essentiellement sur les performances agronomiques.

Cependant, la production nationale ne répond pas au besoin de la population étant donné le faible rendement ce qui classe l'Algérie comme l'un des plus importants pays importateurs des céréales. Ceci est dû essentiellement à:

- La dégradation du sol qui représente une menace pour la survie à long terme de la production agricole;
- Des risques parasitaires accrus (adventices, ravageurs et maladies...);
- Nécessité de la culture de blé à des apports importants en intrants phytosanitaires, ce qui favorise la contamination des nappes souterraines.

Selon **Hamadache et al. (2002)**, la cause principale de la faiblesse de la production est due à des contraintes abiotiques (le gel, la sécheresse surtout), humaines (itinéraires techniques appliqués, vulgarisation, etc...), et sanitaires.

Les maladies des plantes causées par des champignons phytopathogènes sont assez fréquentes et peuvent être responsables de pertes de rendement ainsi que de la dépréciation de la qualité des grains (**Hadjout, 2019**).

Actuellement, plusieurs recherches ont utilisé d'autres méthodes pour améliorer la production de blé, parmi lesquelles une approche basée sur l'utilisation des microorganismes.

Plusieurs microorganismes bactériens sont utilisés pour réduire ou supprimer les dégâts causés par des espèces nuisibles. D'autres espèces peuvent stimuler le développement du système racinaire ainsi la nodulation et favoriser la nutrition minérale de la plante notamment par la fixation biologique d'azote atmosphérique (**Dilfusa et Gisela,2002**).

Ces micro-organismes bactériens dits d'intérêt agricole, vivent au niveau de la rhizosphère et impactent directement le sol et les plantes. Elles ont été qualifiées par la communauté scientifique de PGPR (Plant Growth- Promoting Rhizobacteria).

De nombreux travaux ont montré que ces rhizobactéries interviennent dans le bio- contrôle de la plante par la diminution des effets délétères des phytopathogènes en synthétisant des antibiotiques spécifiques (**Fischer et al., 2009**).

D'autres travaux ont montré que les PGPR peuvent aussi être utilisés en tant que biostimulants, souvent utilisés en complément de la fertilisation « classique », appliqués sur les semences, les feuilles ou le sol (**Baca et Elmerich, 2007;Fischer et al., 2007; Kennedy et al.,2006**).

Le présent travail s'articule autour de trois chapitres :

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les céréales et les principaux microorganismes nuisibles qui lui sont associés.
- Le deuxième chapitre s'intéresse aux PGPR et leurs modes d'action.
- Le troisième chapitre s'intéresse aux PGPR et leurs utilisations comme bio fertilisants et bio pesticides, et débouche sur une conclusion générale et les perspectives de cette étude bibliographique.

Chapitre I :
Généralité sur
les céréales

Chapitre I : Généralité sur les céréales

I.1. Céréaliculture :

Par définition, une céréale est une plante cultivée principalement pour ses grains utilisés pour l'alimentation humaine et animale. La plupart des céréales appartiennent à la famille des poacées (anciennement graminées). On y associe aussi certaines plantes d'autres familles botaniques, comme le sarrasin (polygonacées), le quinoa ou l'amarante (chénopodiacées) qui sont en fait des pseudo-céréales (**Henrotte, 2016**).

Les céréales présentent l'ensemble des plantes cultivées en vue d'obtention du grain à l'albumen (**Belaid, 1986**).

Les céréales représentent la base de l'alimentation humaine mais également animale.

Elles apportent l'énergie nécessaire au travail musculaire ainsi qu'au fonctionnement plus général de l'organisme. Chaque continent a sa céréale adaptée au climat et au sol.

Les habitants du bassin méditerranéen sont les principaux utilisateurs du blé dur: les pâtes, le couscous, le boulgour et le pain sont les principaux produits alimentaires issus de quatre technologies complètement différentes. Les procédés industriels exploitent également ces technologies, issues de la tradition, et aujourd'hui il est possible de trouver de bons produits industriels à côté des produits artisanaux, bien que les pâtes, le couscous, le boulgour et le pain soient encore fabriqués à la maison (**Ranieri, 2015**).

1.2. Historique de céréaliculture

La céréaliculture est très ancienne, on trouve des traces de blé, de seigle, d'avoine, et d'orge à 6 rangs dès le Néolithique. Le riz, le millet, le sorgho, le blé étaient cultivés 2700 ans avant notre ère en Chine. Les Égyptiens de l'ancienne Égypte connaissaient le blé et le sorgho.

Les céréales ont d'autre part joué un rôle capital dans le développement de l'humanité, la plupart des civilisations se sont développées autour d'une céréale:

- Les civilisations asiatiques, autour de la culture du riz.
- Les civilisations précolombiennes, autour du maïs.
- Les civilisations babyloniennes et égyptiennes, autour du blé.

1.3. Importance et utilisation des céréales

Les céréales constituent 45% des apports énergétiques dans l'alimentation humaine. Il existe trois groupes de céréales majeures qui correspondent à 75% de la consommation céréalière mondiale. Un premier grand groupe de céréales est formé par le blé, l'orge, le seigle et l'avoine, ce groupe, émerge dans le croissant fertile, berceau des civilisations occidentales qui

ont donc leur point de départ au Moyen Orient et au Proche Orient. Un deuxième grand groupe est formé par le maïs qui est originaire d'Amérique centrale, il est à la base des civilisations amérindiennes. Un troisième grand groupe est ordonné autour du riz, qui est une plante originaire des régions chaudes et humides de l'Asie du Sud-est. Sa domestication s'est faite de façon synchrone avec la domestication du blé plus à l'Ouest. Le riz est à la base des civilisations orientales (**Clerget, 2011**).

Les céréales ont une grande importance économique parce qu'elles apportent sous un petit volume, une matière première très riche en calories, facilement transportable et conservable, c'est alors un aliment concentré (**Moule, 1971**).

D'après **Abecassis et Vermeersch (2006)**, à l'aube du 21ème siècle, les céréales servent à l'alimentation des animaux avant de nourrir les hommes. Les principaux usages des grains et graines sont les suivants :

- **alimentation animale:** graines (et pailles) de céréales, issues de mouture, tourteaux d'oléo-protéagineux ;
- **alimentation humaine :** farine, pain et biscuit (blé tendre), semoule, pâte alimentaire, couscous et blé précuit (blé dur), polenta (maïs), riz blanc ou étuvé.
- **boissons:** bière (malt et orge), whisky, gin.....
- **ingrédients alimentaires:** amidonnerie et glutennerie (blé, maïs).
- **industries non alimentaires:** biocarburants, industrie chimique (glucides, lipides).

Dans le monde entier, les céréales sont le premier produit alimentaire, ainsi le monde entier dépend des céréales. En Suisse, les habitants produisent principalement du blé, alors qu'en Afrique, c'est le millet. En Asie, c'est le riz et en Amérique du Sud c'est le maïs, céréale qui vient en tête des quantités produites dans le monde devant le riz et le blé (**Iseli-Trösch, 2019**).

2. Céréales cultivées

Les cinq céréales les plus cultivées dans le monde sont dans l'ordre: le maïs, le blé dur, le blé tendre, le riz, l'orge et le sorgho.

2.1. Le blé dur (*Triticum durum* Desf.)

Le blé est une plante herbacée annuelle, monocotylédone, produit un fruit sec indéhiscent (caryopse). Ses tiges sont creuses (chaumes) munies de nœuds d'où partent des feuilles alternes formées d'un pétiole engainant et d'un limbe à nervures parallèles.

L'appareil reproducteur est un épi constitué d'un rachis où s'attachent des épis plus petits

(épillets renferment 1 à 3 fleurs chacun). Les deux bractées membraneuses concaves (glumes situées à la base de chaque épillet). Certaines glumes sont munies d'une arrête appelée communément « barbe ». Deux glumelles (adhérentes au grain ou pas) entourent chaque fleur. Les glumes et glumelles forment les « balles » et ne doivent pas être confondues avec le « son » qui correspond à l'enveloppe du grain.

Le grain de blé est un fruit sec indéhiscant à une seule graine dont le tégument adhère à la paroi du fruit, qu'on appelle caryopse (Codou- David, 2018).

2.2. Classification botanique

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une monocotylédone de la famille des Graminées, de la tribu des Triticées et du genre *Triticum*., a nombre chromosomique ($2n = 2X = 28$) (Blés tétraploïdes) et grains durs et vitreux (Codou-David, 2018).

2.3. Systématique de blé dur (*Triticum durum* Desf.)

Le blé dur appartient au :

Règne : Plantae

Embranchement : Angiospermes

Sous embranchement : Spermaphytes

Classe : Monocotylédones

Ordre : Glumiflorales

Super ordre : Comméliniflorales

Famille : Graminée (Poaceae)

Sous Famille : Pooideae

Tribu : Triticeae

Sous tribu : Triticinae

Genre : *Triticum*

Espèce : *Triticum durum* Desf.

2.4. Composition chimique des grains de blé

Selon Feillet (2000), le grain est principalement constitué d'amidon (environ 70%), de protéines (10 à 15%) selon les variétés et les conditions de culture, les autres constituants, pondéralement mineurs (quelques% seulement), sont les lipides, la cellulose, les sucres libres, les minéraux et les vitamines.

La composition chimique de 100 g de graines mûres et crues de blé est représentée dans le **tableau 01**.

Tableau 01: Composition chimique de 100g de graines mûres et crues de blé dur

Composition chimique	Blé dur
Eau	10.9
Energie (kcal)	339 kcal
protéines	13.7g
Lipides	2.5g
Glucides	71.1g
Fibre Alimentaire	-
Lysine	303mg
Méthionine	221mg
Thréonine	366mg
Tryptophane	81mg
leucine	934mg
Phosphore	508mg
Calcium	34mg
Magnésium	144mg
Potassium	500mg

(Source : USDA, 2005)

3. Blé en Algérie

3.1. Production, Consommation et Importation

Les céréales et leurs dérivées constituent l'alimentation de base dans beaucoup de pays en développement, particulièrement dans les pays maghrébins, notamment en Algérie.

En Algérie, les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. 54% des apports énergétiques et 62% des apports protéiques journaliers provenaient de ces produits et le blé représentait 88% de ces céréales consommées (Kellou, 2008).

La production des céréales, jachère comprise, occupe environ 80% de la superficie agricole utile (SAU) du pays, La superficie emblavée annuellement en céréales se situe entre 3 et 3,5 million d'ha. Les superficies annuellement récoltées représentent 63% des emblavures. Elle apparaît donc comme une spéculation dominante.

L'Algérie est l'un des plus grands pays consommateurs de céréales au monde avec plus de 200 kg/HA/an (Hammadeche, 2010). Elle figure ainsi parmi les plus 03 grands pays importateurs de blés au monde (FAO, 2020).

Comparativement à la moyenne mondiale, qui est de 29 qx/ha pour 2004, le rendement de blé algérien n'est que pour les meilleures années 50 % de la moyenne mondiale. Il est en moyenne de 10,5 qx/ha, il est parmi les plus faibles au monde (Kellou, 2008)

4. Contraintes de la production de blé

L'agriculture algérienne est structurellement inapte à satisfaire une demande de blé de plus en plus importante. La faiblesse relative des niveaux de rendement, trouve son explication dans trois raisons principales: l'une abiotique, l'autre biotique et des contraintes d'ordre techniques.

4.1. Les contraintes abiotiques

La céréaliculture en Algérie est confrontée à des aléas climatiques importants:

- Insuffisance et irrégularité des précipitations durant le cycle végétatif de la culture (stress hydrique).
- Fortes températures et les déficits hydriques en fin de cycle et pendant le remplissage du grain.
- Gelées tardives et siroccos précoces affectant la culture aux stades critiques de son développement (floraison et formation du grain).

4.2. Les contraintes biotiques

Les cultures sont les milieux propices au développement de divers végétaux et animaux. La culture du blé dur est soumise à différents stress biotiques affectant qualitativement et quantitativement le rendement. Une estimation faite par **Feliachi (2002)**, sur les pertes causées par les ennemis du blé que ce soit lors de la récolte ou lors du stockage est voisine de 30 %. Cette dépréciation est le résultat de l'existence de plusieurs agents tels que les champignons, les virus, les bactéries, les nématodes.

4.2.1. Les maladies cryptogamiques du blé dur

Le biotope que conçoit le blé dur est favorable pour le développement de plusieurs maladies entre autres les maladies fongiques. Ces dernières peuvent être classées en 03 selon les symptômes qu'elles engendrent (**Aouali et Douici-Khalfi, 2009**):

- Maladies causant des symptômes localisés sur feuillage.
- Maladies causant des pourritures racinaires.
- Maladies causant des symptômes sur les épis.

Le tableaux 02 resume les principales maladies fongiques affectant la production du blé.

Tableau 02: Les principales maladies fongiques affectant la production du blé.

Maladie / Organes attaqués	Nom de la maladie	Agents causaux	Transmissi on par semence	Sources
Fontes de semis	Fonte de semis (<i>damping-off</i>)	<i>Stagonospora nodorum</i> (Berk.) E. Castell. & Germano,	Oui	(Aouali et Douici- Khalfi, 2009) (Zillinsky, 1983)
		<i>Fusarium</i> spp.	Oui	(Weise, 1987) (Simon et <i>al.</i> , 1989)
		<i>Microdochium nivale</i> (Fr.) Samuels & I.C. Hallett	Oui	
Le pied du blé	Piétin verse (<i>eyespot</i>)	<i>Oculimacula yalundae</i> (Wallwork & Spooner) Crous & W. Gams,	–	(Zillinsky, 1983) (Weise, 1987) (Simon et <i>al.</i> , 1989)
	Piétin échaudage (<i>take-All</i>)	<i>Gaeumannomyces graminis</i> (Sacc) Arx & Oliver var. <i>tritici</i> Walker	–	(Aouali et Douici- Khalfi, 2009) (Smiley et <i>al.</i> , 2009)
	Fusariose du pied (<i>common foot rot</i>)	<i>Fusarium</i> spp. <i>Cochliobolus sativus</i> (S.Ito & Kurib.) Drechsler ex Dastur <i>Microdochium nivale</i>	Oui Oui Oui	
Rouille brune (<i>leaf rust</i>)	<i>Puccinia recondita</i> Dietel & Holw.,	Non	(Aouali et Douici- Khalfi, 2009)	
Rouille noire (<i>stem rust</i>)	<i>Puccinia graminis</i> subsp. <i>graminis</i> Pers.	Non	(Kolmer et <i>al.</i> ,2009)	
Rouille jaune	<i>Puccinia striiformis</i> Westend. f. sp. <i>tritici</i>	Non		

les feuilles et l'épi	(<i>stripe rust</i>)	Erikss.		
	Septorioses Tache des glumes (<i>glume blotch</i>) Tache septorienne de blé (<i>septoria leaf blotch</i>)	<i>Stagonospora nodorum</i> (Berk.) E. Castell. & Germano, <i>Septoria tritici</i> Berk. & M.A. Curtis,	Oui Non	(Weise, 1987) Aouali et Douici-Khalfi, 2009)
	Tache helminthosporienne (<i>tan spot</i>)	<i>Pyrenophora tritici-repentis</i> (Died.) Drechsler	Faible	(Weise, 1987) (Aouali et Douici-Khalfi, 2009)
	Charbon foliaire (<i>flag smut</i>)	<i>Urocystis agropyri</i> (Preuss) A.A. Fisch. Waldh.,	Oui	
	Oïdium (<i>Powdery mildew</i>)	<i>Blumeria graminis</i> (DC.) Speer f. sp. <i>tritici</i> É.J. Marchal.	Néant	
L'épi	Carie commune (<i>Common Bunt</i>)	<i>Tilletia caries</i> (DC.) Tul. et C. Tul. <i>Tilletia laevis</i> J.K. Kühn.	Oui	(Weise, 1987) (Simon et al., 1989) (Aouali et Douici-Khalfi, 2009)
	Charbon nu (<i>loose smut</i>)	<i>Ustilago tritici</i> (Pers.) Rostr.	Oui	(Marshall, 2009)
	Gale de l'épi (<i>head blight, head scab</i>)	<i>Fusarium</i> spp. <i>Microdochium nivale</i>	Oui Oui	

4.2.2. Les adventices du blé dur

La flore adventice occasionne des pertes de 20 % sur la céréaliculture, 50 % est l'estimation qu'a faite l'Algérie pour les pertes sur la culture de blé dur (**Melakhessou, et al., 2018**). Deux groupes d'adventices pouvant entraver le développement des céréales (blé dur), il s'agit des adventices graminées ou les monocotylédones et les adventices dicotylédones.

Le tableau 03: Les adventices du blé dur

Les adventices du blé dur		
Les adventices monocotylédones	<i>Avena sterilis</i> L. (Folle avoine) <i>Phalaris paradoxa</i> L. (L' alpiste)	(Hammadache, 1995 ; Tanji, 2000 et Tanji, 2002)
les adventices dicotylédones	<i>Sinapis arvensis</i> L. (Moutarde des champs) <i>Medicago polymorpha</i> L. (Luzerne)	(Hammadache, 1995 ; Tanji, 2000 et Tanji, 2002)

4.2.3. Les bactéries, les virus, les nématodes et autres ravageurs

En plus des champignons et des adventices et, certaines espèces faunistiques contribue à la perte qualitative et quantitative du rendement du blé dur. Le **tableau 04** résume les principaux ennemis de blé dur.

Tableau 04: Les bactéries, les virus, les nématodes et autres ravageurs du blé en Algérie

Bio agresseur	Noms scientifiques	Sources
Les bactéries	<i>Rathayibacter tritici</i> (Carlson and Vidaver 1982) Zgurskaya et al. 1993 <i>Erwinia rhapontici</i> (Millard 1924) Burkholder 1948 emend. Hauben et al. 1998 <i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>translucens</i> (Jones et al. 1917) Dye 1978 <i>Pseudomonas viridiflava</i> <i>Pseudomonas fuscovaginae</i> (ex Taniiet et al.) Miyajima et al. 1993	(Boukhris, 1992) (Djebari, 2005)

	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>Atrofaciens</i> (McCulloch 1920) Young et al. 1978	
Les virus	BYDV (Barley Yellow Dwarf Virus) WSMV (Wheat Streak Mosaic Virus) WSSMV (Wheat Spindle Streak Mosaic Virus) BSMV (Barley Stripe Mosaic Virus)	(Sayoud, 1987), (Boubetra et Mohamedi, 1998) Benmokhtar et Kafi, 1999)
Les nématodes	<i>Heterodera avenae</i> Wollenweber	(Harrouche, 1998)
Les ravageurs	Les insectes (la punaise des céréales) Les oiseaux (les moineaux, la tourterelle) Les rongeurs (les rats des champs et les souris)	(Taghlit, 1986)

4.3. Contraintes agronomiques

Les problèmes agronomiques sont essentiellement techniques

- Perturbation dans la réalisation des itinéraires techniques.
- Le bas niveau de technicité des exploitants agricoles.
- Semis mal effectués.
- Façons culturales non appropriées (**Feliachi, 2000**).

5. Utilisation des engrais et de produits phytosanitaires

5. 1. Utilisation des engrais

Les engrais sont des substances, le plus souvent des mélanges d'éléments minéraux, destinées à apporter aux plantes des compléments d'éléments nutritifs, de façon à améliorer leur croissance, et à augmenter le rendement et la qualité des cultures. Selon les données collectées pour la période 1983-91, les engrais les plus utilisés sont l'ammoniac puis les engrais **NPK**, **PK** et **DAP** sont d'usage aléatoire. Pour des raisons de disponibilité sur le marché et d'autres raisons dont le prix et le transport.

L'engrais azoté reste le plus utilisé, probablement pour son effet instantané et remarquable sur

les cultures de céréales et dont l'impact sur la culture est mesurable (visible), à l'inverse des autres engrais dont l'effet sur les cultures n'est pas apparent. (**Service de la gestion des terres et de la nutrition des plantes 2005**).

L'engrais phosphaté vient en deuxième position après l'engrais azoté car le phosphore est l'un des trois éléments majeurs de la fertilisation des cultures et il est indispensable à la croissance des plantes. Il est reconnu comme l'élément clé du développement racinaire des cultures et de leur croissance en début de cycle. La proportion de phosphore minéral et organique varie selon les sources d'engrais organiques utilisées (**Cantin, 1998**).

5.2. Apport de produits phytosanitaires

Le terme pesticide dérive du mot anglais « pest » qui désigne tout animal ou plante (virus, bactérie, champignon, ver, mollusque, insecte, rongeur, oiseau, et mammifère) susceptibles d'être nuisible pour l'homme et à son environnement et de « cide », du latin signifiant frapper, abattre, tuer (**Louchahi, 2014**).

Les différentes substances qui composent les pesticides ciblent directement les bioagresseurs du blé dur qui sont: les adventices mauvaises herbes, les champignons parasites et les insectes entrant en concurrence contre les cultures ou provoquant des maladies et par conséquent une diminution de la productivité et des pertes quantitatives et qualitatives des rendements (**Fritas, 2012**).

L'usage des pesticides est en constante évolution à travers tous les pays du monde. En effet, selon les constatations des experts mondiaux, la demande en pesticides double pratiquement tous les 10 ans, depuis 1945. Ces produits sont plus utilisés dans les pays développés. En Algérie, l'usage des pesticides dans le domaine de l'agriculture est de plus en plus fréquent suite à l'augmentation des superficies cultivées. Ainsi, environ 7000 spécialités commerciales dont 400 substances actives de pesticides sont homologués (**Bouziane, 2007**).

(**Kheddam-Benadjal (2012)**), indique que les fongicides et les insecticides sont les pesticides les plus utilisés en Algérie avec une utilisation intensive et anarchique dans divers domaines.

5.3 Effets des pesticides sur l'environnement

Plusieurs données toxicologiques disponibles concernant les pesticides et leurs impacts sur l'environnement et la santé publique, militent en faveur d'une grande prudence dans leur utilisation. Par ailleurs, plusieurs enquêtes ont été faites sur l'application de ces produits, en Algérie et dans plusieurs pays du monde, et ont montrés l'absence de la bonne pratique des produits phytosanitaires (**Multigner, 2005**).

La non-sélectivité des pesticides et le traitement répétitifs dans les mêmes parcelles sont parmi

les principales causes de la toxicité des pesticides.

Les animaux peuvent être intoxiqués par les pesticides, par contact direct, lors de la pulvérisation ou juste après, en consommant de la végétation traitée, en mangeant une proie elle-même intoxiquée, ou en buvant de l'eau contaminée. Les risques liés à l'utilisation incontrôlée des pesticides ont dépassés leurs effets bénéfiques. Ces produits affectent l'environnement en réduisant la qualité de ses différents compartiments: l'air, l'eau, le sol, la flore et la faune (**Hakeem et al., 2016; Ramade, 2005**).

En général, l'utilisation des pesticides inorganiques entraîne souvent de graves effets toxicologiques sur l'environnement par accumulation dans les sols de matériaux fort toxiques tel que: le plomb, l'arsenic et le mercure (des éléments chimiques qui ne se dégradent pas).

6. Amélioration de la production des céréales par les microorganismes

Répondre aux besoins alimentaires est l'un des plus gros défis auxquels l'agriculture moderne doit faire face. En effet, l'agriculture est affectée par les stress biotiques et abiotiques qui diminuent le rendement et engendrent un revenu faible.

Les nouveaux procédés biotechnologiques de reproduction ou de multiplication des céréales par la méthode d'inoculation des plantes par les microorganismes tels que les PGPR «**Plant Growth Promoting Rhizobacteria**» et les champignons endomycorhiziens s'avèrent un créneau promoteur. Cette nouvelle technique est en mesure d'apporter des solutions dont souffrent plusieurs variétés des cultures. Cette méthode est considérée comme une nouvelle stratégie de traitement pour assurer le maintien et la régularité de la production naturellement sans risque sanitaire plus productive et moins dépendante des engrais chimiques. Les interactions biologiques des agroécosystèmes avec les PGPR semblent une meilleure alternative. En effet, les PGPR peuvent apporter plusieurs avantages aux plantes, leurs effets significatifs ont été observés sur diverses cultures agricoles, y compris les légumineuses, les céréales, et d'autres espèces de plantes importantes.

Chapitre II :
Données sur les PGPR et
leurs modes d'action

Chapitre II : Données sur les PGPR et leurs modes d'action

II.1. Définition de la rhizosphère

Le terme rhizosphère, employé pour la première fois en 1904 par le biologiste allemand **Hiltner**, signifie étymologiquement *rhiza* "racine" et *sphere* "ce qui entour" la rhizosphère est donc la région du sol immédiatement adjacent (environ 2 mm) aux racines des plantes et qui est directement ou indirectement influencée par celles-ci (**Bais et al.,2006**).

Elle représente le lieu d'échange essentiel entre la plante et le sol. On y observe une présence importante de micro-organismes liés les uns aux autres par de complexes réactions positives ou négatives (**Fuchs et Herisse, 1999**).

On distingue en général trois zones dans la rhizosphère (**figure01**) (**Roger et Garcia,2001**):

- La rhizosphère au sens strict: elle correspond à la fine couche de sol qui adhère fermement aux racines.
- Le rhizoplan ou surface des racines dans la microflore est extraite par agitation vigoureuse des racines.
- L'endorhizosphère correspondant aux espaces intercellulaires du cortex colonisés par les microorganismes. On qualifie alors d'exorhizosphère la région du sol située au voisinage de la racine et influencée par celle-ci (**Gobat et al., 2003**).

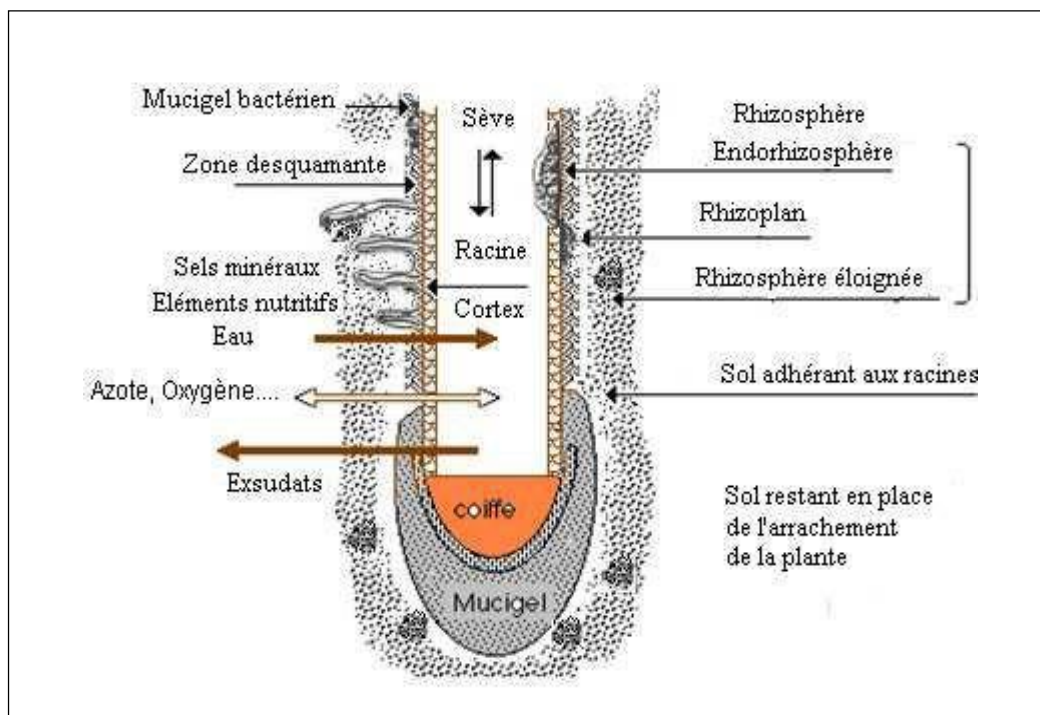


Figure 01: Schéma de la rhizosphère (Roger et Garcia,2001).

II.2. Rôle de la rhizosphère

Le rôle de la rhizosphère peut être résumé dans les points suivants :

- La rhizosphère joue un rôle essentiel dans les processus de phytoremédiation (Maalem et Sansri, 2014).
- La rhizosphère rendue compte de la stimulation de la croissance et de l'activité des communautés microbiennes autour des racines (Grayston *et al.*, 1997).
- Elle contribue à modifier les propriétés des sols : propriétés biologiques, biodiversités et activités microbiennes, fertilité et qualité du sol (Gobat *et al.*, 2010).

II.3. les rhizobactéries de la rhizosphère

La niche rhizosphérique représente un habitat propice à la colonisation microbienne. Cependant ces microorganismes ne sont pas répartis aléatoirement dans le sol. Le sol est un milieu vivant composé de nombreux microorganismes, essentiellement hétérotrophes, c'est-à-dire qui ont besoin d'une source de carbone organique pour réaliser leur croissance. La libération de carbone organique dans la rhizosphère constitue une source importante de nutriments pour ces microorganismes. Cette interaction trophique est à la base de l'effet rhizosphère (figure 02).

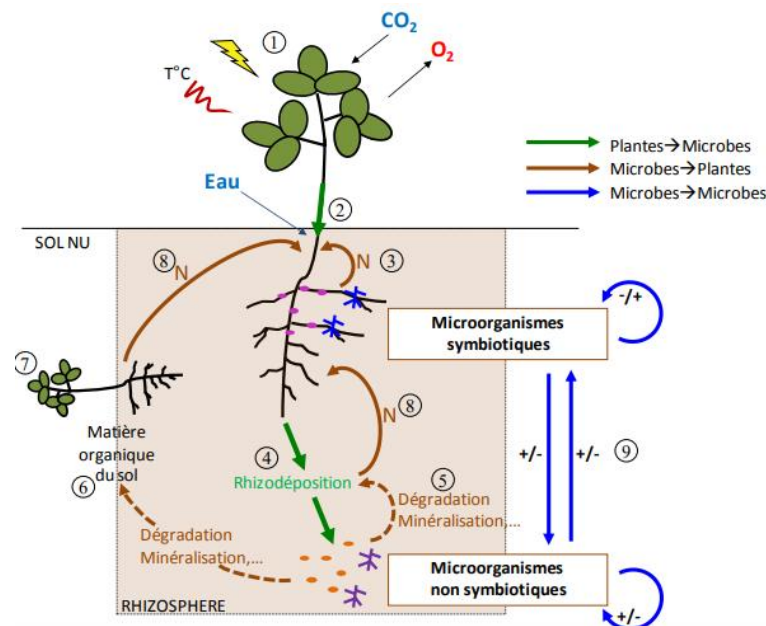


Figure 02: Représentation schématique des interactions mutualistes entre la plante (autotrophe) et les microorganismes (hétérotrophes) et entre les microorganismes eux-mêmes au sein de la rhizosphère.

(1) La plante réalise la photosynthèse grâce à l'énergie lumineuse, le CO₂, l'eau et les nutriments ; la température est également un facteur important dans ce processus. (2) Une partie des photosynthétats produits par la plante suite à la photosynthèse va être fourni aux microorganismes symbiotiques qui (3) en échange vont fournir des nutriments (N) à la plante. (4) Le reste des photosynthétats sera libéré dans le sol, via la rhizodéposition, et disponible pour la croissance des microorganismes non symbiotiques. Ces derniers vont, en retour, dégrader la matière organique présente (5) dans la rhizosphère ou (6) dans le sol nu, ainsi que (7) la matière végétale à la mort de la plante afin de (8) fournir des nutriments à la plante. (9) Il existe aussi des interactions entre les microorganismes eux-mêmes qui peuvent intervenir dans les interactions plante-microbes.

L'impact des rhizobactéries sur la croissance des plantes (**figure2**) peut être neutre, positif ou négatif (**Whipps, 2001**). Ainsi, on distingue:

- Les bactéries saprophytes n'ayant pas d'effet évident connu sur la croissance et la physiologie de la plante (**Beattie, 2006**).
- Les bactéries bénéfiques sur la croissance et la physiologie de la plante telles:

***Les bactéries symbiotiques**, fixatrices d'azote (Rhizobiacées, bactéries actinorhiziennes de type (*Frankia*).

***Les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes** (PGPR), non symbiotiques, diazotrophes ou non comme le cas des *Pseudomonas spp. fluorescents* (**Lemanceau, 1992; Glick, 1995**).

Certaines espèces microbiennes comme les bactéries *Pseudomonas* (**Doornbos et al ,2012**) ou les champignons du genre *Trichoderma* (**Harman et al ,2004**) sont des microorganismes libres, non symbiotiques à la base, mais qui ont aussi la capacité de s'associer avec une plante et de s'établir dans les racines. Ils vont alors s'assurer une source de nutriments et vont être bénéfiques pour la plante hôte. Les bactéries qui sont mutualistes vis-à-vis de la plante, qu'elles soient symbiotiques ou non, sont appelées bactéries **PGPR** (Plant growth promoting rhizobacteria), ou Rhizobactéries promouvant la croissance de la plante. Elles ont des effets bénéfiques sur le développement et la croissance végétale, le contrôle des pathogènes et la dégradation des composés toxiques pour la plante (**Bakker et al 2007**).

- Les bactéries ayant des effets néfastes sur la croissance et la physiologie de la plante (**Beattie,2006**)

***Les bactéries phytopathogènes:** Une large variété de bactéries sont responsables de

rouilles, de flétrissements, de pourritures, de chancres et de galles. *Agrobacterium tumefaciens* provoque la galle du collet qui se manifeste par la formation d'excroissances tumorales sur la plante. *Pseudomonas phaseolicola* est responsable de la rouille des haricots (**Prescott et al., 2010**).

***Les bactéries délétères (DRB)**: Elles sont difficiles à mettre en évidence car elles ne sont pas intimement associées aux tissus comme les parasites.

II.4. Les rhizobactéries stimulatrices de la croissance végétale (PGPR)

On désigne ces bactéries par le terme **RFCP** ou " **R**hizobactéries **F**avorisant la **C**roissance des **P**lantes ", ou **PGPR** en anglais " **P**lant **G**rowth **P**romoting **R**hizobacteria ". Néanmoins, en raison de leur nature, leur origine et leurs différentes actions sur les plantes, d'autres appellations telles que **EPR** ou " **E**mergence-**P**romoting **R**hizobacteria ", **PGPB** ou " **P**lant **G**rowth **P**romoting **B**acteria ", " biocontrol-PGPB " voire même **YIB** ou " **Y**ield-**I**ncreased **B**acteria" peuvent être rencontrées dans la littérature (**Compant, 2007**).

Les PGPR sont généralement des bactéries **Gram-négatives**. Les plus fréquemment identifiées sont des pseudomonas des fluorescentes. On trouve dans ce groupe, les *P.fluorescens* et *P.putida* qui sont les espèces les plus abondantes avec une capacité de promouvoir la croissance des plantes et augmenter le rendement des cultures (**Vivas et al., 2003**). On compte aussi des *Bacillus*, des *Azospirillum*, des *Azotobacter*, des *Klebseilla*, des *Enterobacter*, des *Rhizobium* et des *Serratia* spp. (**Beauchamp et al., 1993**).

Les PGPR peuvent agir positivement sur la plante par des mécanismes d'action directs ou indirects. Sur la base de leurs activités (**tableau 05**), elles peuvent être classées comme suit (**Martínez-Viveros et al., 2010**):

- Biofertilisants (amélioration de la biodisponibilité des nutriments).
- Phytostimulateurs (promotion de la croissance des plantes, généralement par la synthèse de phytohormones).
- Rhizoremédiateurs (dégradation des polluants organiques).
- Biopesticides (bio contrôle des agents phytopathogènes, principalement par la production d'antibiotiques et de métabolites antifongiques).

Tableau 05: Les termes adoptés pour la classification des mécanismes par les quels les PGPR stimulent la croissance des plantes (Martínez-Viveros *et al.*, 2010).

Terme	Définition	Mécanismes	Référence
Biofertiliseur	Une suspension contenant des microorganismes vivants qui, une fois appliquée sur des graines, sur une plante ou dans le sol colonisent la rhizosphère ou l'intérieur de la plante et promeuvent la croissance par l'augmentation de la disponibilité des nutriments principaux pour la plante hôte	-La fixation biologique de l'azote. -L'utilisation des formes insolubles de phosphore	Vessey, 2003 ; Somers et al., 2004 ; Fuentes Ramirez et Caballero Mellado, 2006
Phyostimulateur	Des microorganismes qui ont la capacité de produire ou de changer la croissance la concentration des régulateurs de la croissance.	-Production des phytohormones. -Réduction de la concentration de l'éthylène à l'intérieur de la plante.	Lugtenberg et al., 2002 ; Somers et al., 2004
Biopesticide ou agent de biocontrôle	Des microorganismes qui stimulent la croissance d'une plante par la production des antibiotiques et des métabolites antifongiques.	-Production des antibiotiques. -Production des enzymes qui dégradent les membranes des cellules fongiques. -La compétition. - RSI et RSA	Vessey, 2003 ; Somers et al., 2004 ; Chandler et al., 2008.

II.5. Les effets bénéfiques des PGPR

Les PGPR présentent différents mécanismes d'action sur la plante (**figure 3**). Certaines de ces bactéries ont des effets phytobénéfiques directs, par exemple via la réduction de l'azote atmosphérique N₂ en ammoniac NH₃. Cette fixation de l'azote s'effectue à l'état libre sur la racine ou dans les tissus racinaires en cas de PGPR endophytes, et une partie de l'azote fixé peut être acquise par la plante (Behl *et al.*, 2012). Ces bactéries fixatrices d'azote sont présentes dans la rhizosphère du blé (Venieraki *et al.*, 2011), et leur inoculation peut

permettre d'augmenter le rendement du blé (Behl et al., 2012 ; Neiverth et al., 2014). Leur diversité et leur activité varient selon le cultivar (Manske et al., 2000 ; Venieraki et al., 2011). Des effets positifs des PGPR sur la disponibilité du phosphore dans la rhizosphère sont également connus (Vacheron et al., 2013).

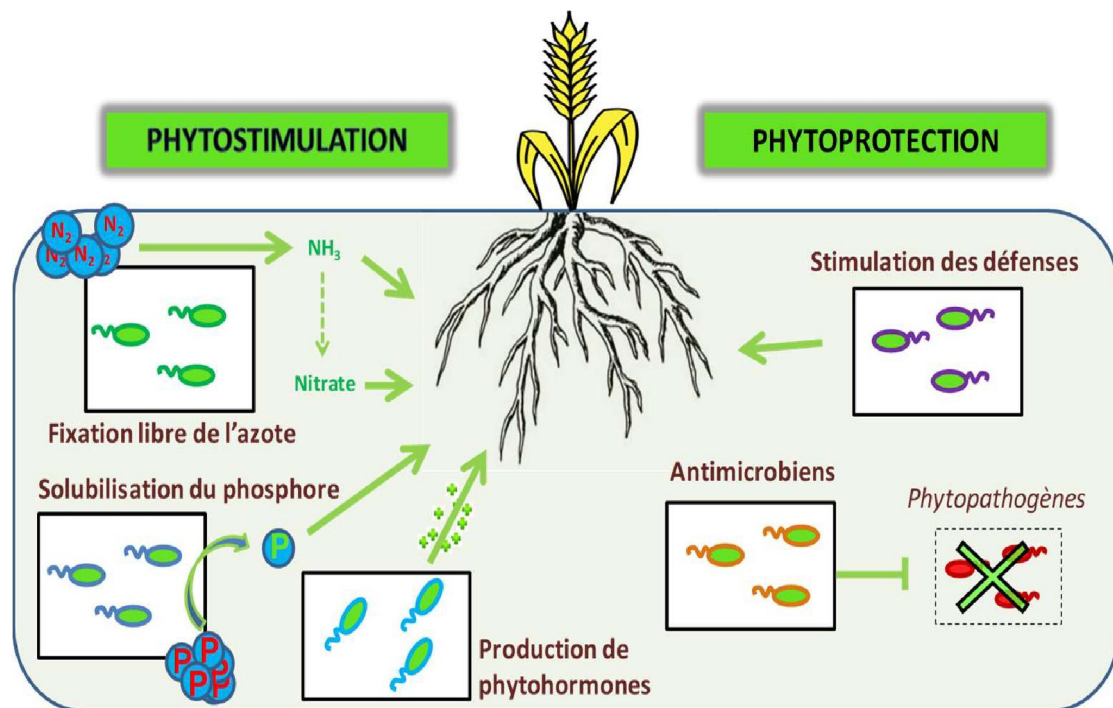


Figure 3 : Modes d'action des rhizobactéries bénéfiques, qui conduisent à des effets de phytostimulation ou de phytoprotection du blé (d'après Vacheron et al., 2013; Levy et al., 2018).

Plusieurs PGPR améliorent l'acquisition de l'eau et des nutriments minéraux par la plante, suite aux effets de stimulation bactérienne du développement du système racinaire (Creus et al., 2004 ; Behl et al., 2012). Chez le blé, ces effets se matérialisent in vitro par une augmentation du nombre et/ou de la longueur de racines, avec une élongation des poils racinaires suite à l'inoculation (Combes-Meynet et al., 2011). Ces effets positifs de l'inoculation de PGPR sur l'architecture et la biomasse racinaire ont aussi été observés pour du blé cultivé en sol (Veresoglou et Menexes, 2010). Ils reposent sur la production bactérienne de phytohormones, comme des auxines (Behl et al., 2012 ; Vacheron et al., 2013). D'autres signaux moléculaires stimulant la ramification du système racinaire sont documentés, comme le 2,4- diacétyl phloro glucinol produit par les *Pseudomonas fluorescens* et l'oxyde nitrique produit par de nombreux *Azospirillum brasilense*, qui tous deux agissent via la voie de transduction de l'auxine (Vacheron et al., 2013, 2017). Les PGPR peuvent aussi conduire à une modification du métabolisme racinaire de l'éthylène, par désamination bactérienne de son précurseur chez la plante (l'acide 1-aminocyclopropane carboxylique ;

ACC). Cela conduit à une réduction de la concentration en éthylène dans les racines et à la répression de la croissance racinaire (Vacheron et al., 2013).

Les PGPR peuvent aussi améliorer la santé du végétal. Ces effets passent par une inhibition des pathogènes des racines (effets phytobénéfiques indirects), et/ou l'induction d'une résistance systémique chez la plante (Couillerot et al., 2011 ; Maketon et al., 2012). Par exemple, l'inoculation du blé avec la PGPR *Pseudomonas fluorescens* Q8r1-96 entraîne une accumulation cultivar-dépendante des transcrits racinaires impliqués dans les réactions de défense (Maketon et al., 2012).

II.5.1. Effets phytostimulateurs des bactéries PGPR :

La finalité de la bactérisation est d'augmenter le rendement des cultures. Seules certaines souches semblent présenter cette capacité (Weller, 1988). Elles ont été appelées «Plant Growth Promoting Rhizobacteria» (PGPR) par Kloepper et Schroth (1978).

II.5.1.1. Augmentation de la qualité de nutriment disponible:

Les PGPR affectent directement le métabolisme des plantes en fournissant des nutriments qui sont généralement rares dans la rhizosphère (Ahmad et al., 2008).

a) Fixation libre de l'azote

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 (N₂) en ammonium (NH₄) 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. 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 :

- les diazotrophes exophytes regroupant toutes les bactéries vivant en dehors d'une plante (comme le genre *Azospirillum* et *Klebsiella*).
- 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 tiges 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**).

b) Solubilisation du phosphate

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-Viveros 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 4**). 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* (**Lugtenberg 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 rhizo bactériennes promotrices de la croissance des plantes ; ont été isolés et caractérisés (**Rodriguez et al., 2006**).

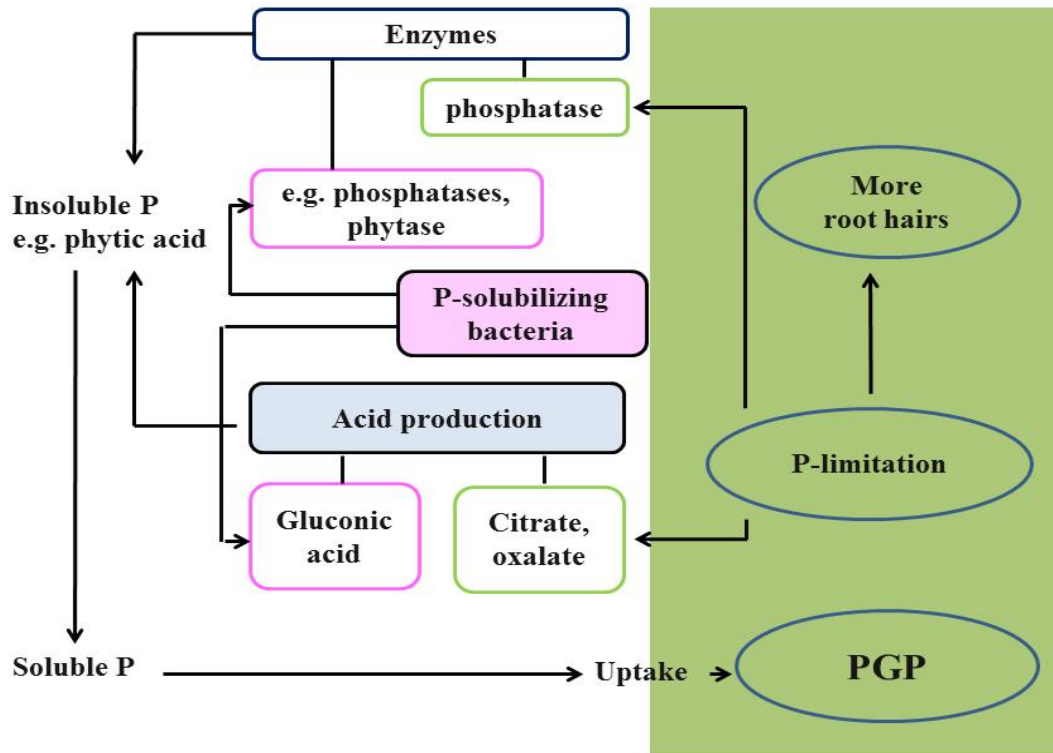


Figure 04. Contribution des microorganismes à la nutrition des plantes en P (Lugtenberg *et al.*, 2013). Couleurs: verte, (plante); rose, (microbes); bleu: (processus)

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).

II.5.1.2. Amélioration de la micro-structure du sol rhizosphérique:

a) 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).

II.5.1.2. Modification de l'équilibre hormonal de la plante (production de phytohormone)

Les phytohormones sont des molécules produites à de très faibles concentrations mais capables de réguler une variété de processus cellulaires chez les plantes. Ils fonctionnent comme des messagers chimiques pour communiquer les activités cellulaires dans les plantes supérieures. Les phytohormones jouent des rôles clés et coordonnent diverses voies de transduction du signal pendant la réponse au stress abiotique. Ils régulent les stimulations externes et internes (**Wani et al., 2016**). Les phytohormones affectent divers aspects de la croissance et de la différenciation des plantes supérieures et sont impliquées dans les interactions biotiques et abiotiques. Les hormones végétales dont l'éthylène, l'acide salicylique et le jasmonate, sont connues pour réguler différemment les réponses de défense contre les agents pathogènes biotrophes et nécrotrophes ; elles sont considérées comme les hormones de l'immunité. En revanche, ce n'est que récemment que l'implication d'autres hormones dans les interactions plantes-pathogènes a été connue (**Dominik et al., 2011**).

Les microbes symbiotique s'associent aux plantes soit en pénétrant dans les tissus végétaux de manière endophytique, soit ils colonisent la surface des racines et coopèrent entre eux en produisant diverses substances métaboliquement actives. La stimulation de la croissance des plantes et l'acquisition des nutriments par les rhizobactéries bénéfiques a été corrélée à la biosynthèse des régulateurs de croissance des plantes, y compris les auxines, les gibbérellines et les cytokinines. Ces régulateurs microbiens modulent les niveaux d'hormones végétales dans les tissus végétaux, et on a constaté qu'ils y avaient des effets similaires à l'application de phytohormones exogènes (**Egamberdieva et al., 2021**).

a) Thidiazuron (Cytokinines)

Les cytokinines (**CK**) constituent un trait important pour la sélection de PGPR efficaces. Ils jouent un rôle crucial dans le contrôle de la division cellulaire végétale, du cycle cellulaire, de la sénescence des feuilles, la mobilisation des nutriments, la formation des méristèmes apicaux des pousses, la dormance et la germination des graines, le développement floral, etc. Chimiquement, les cytokinines sont des aminopurines substituées à l'azote 6, des isoprènes, isoprènes modifiés, des zéatine et des trans-zéatine (**Figure5**) (**Mok, 1994 ; Schaller et al., 2014 ; Sokolova et al., 2011**).

Les cytokinines assurent également la médiation des réponses à des facteurs biotiques et abiotiques extrinsèques variables (**Werner et Schmulling, 2009 ; Grosskinsky et al., 2011 ; Gupta et Rashotte, 2012**).

Les CK régulent la biosynthèse et la biogenèse des chloroplastes et, donc, de la chlorophylle et améliorent l'ouverture des stomates chez certaines espèces (Davies, 2010 ; Cortleven et Schmulling, 2015).

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

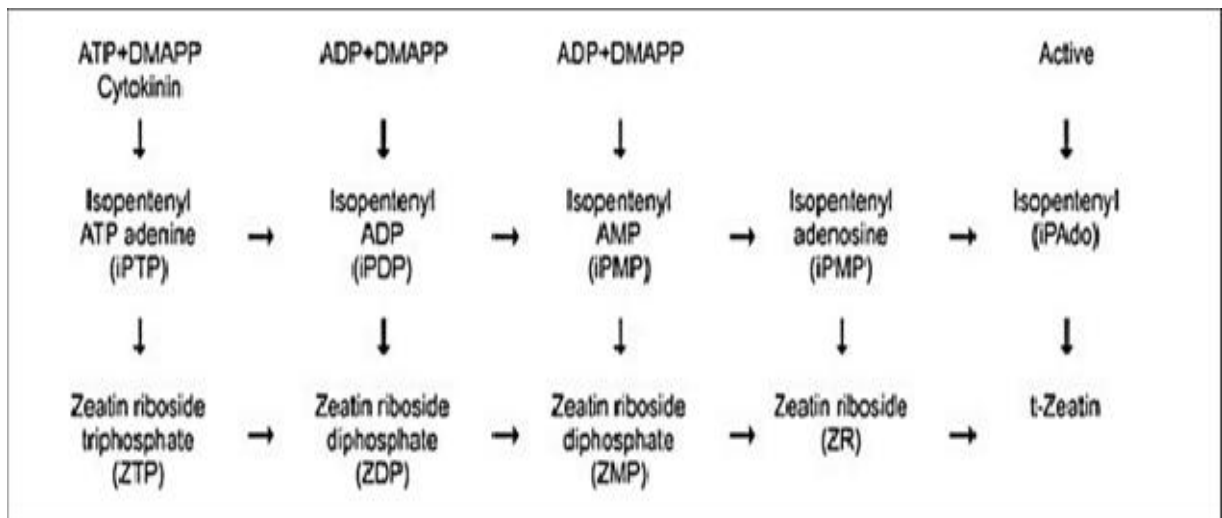


Figure 5 : Biosynthèse des cytokines (Kumar, 2015).

b) Acide Indole-3-acétique (AIA):

L'acide indole acétique (IAA) est l'un des auxines les plus courants et les plus étudiés, et une grande partie de la littérature scientifique considère que l'auxine et l'IAA sont des termes interchangeables. Sa fonction principale est la division cellulaire, l'allongement, la différenciation et l'extension (Kundan *et al.*, 2015). L'IAA est l'une des phytohormones les plus multifonctionnelles et est vitale non seulement pour la croissance et le développement des plantes, mais aussi pour régir et/ou coordonner la croissance des plantes dans des conditions de stress. L'auxine stimule la transcription d'un grand nombre de gènes appelés gènes primaires de réponse auxine, et ces gènes ont été identifiés et caractérisés dans plusieurs espèces végétales dont le riz, et le soja (Wani *et al.*, 2016).

c) **Ethylène et 1-Amino-cyclopropane-1-carbone (ACC) désaminase:**

Certains PGPR sont capables de produire une enzyme, la 1-aminocyclopropane-1-carboxylate désaminase (ACC désaminase), jouant un rôle primordial dans la régulation de la réponse des plantes au stress abiotique, notamment le déséquilibre ionique dû à la sécheresse, la salinité etc. (Saleem et al., 2007).

D'après Arshad et Frankenberger (2002), l'éthylène joue un rôle important dans l'initiation et l'allongement des racines, la nodulation, la sénescence, l'abscission et la maturation ainsi que la signalisation des contraintes.

L'éthylène est une hormone végétale jouant un rôle important dans la croissance des plantes. Cependant, un état de stress provoque la synthèse de quantités excessives de cette hormone par les plantes, menant, entre autres, à une défoliation et à d'autres processus cellulaires pouvant réduire les performances et le rendement des cultures. Le précurseur de synthèse biologique de l'éthylène chez les plantes est l'ACC et, heureusement, les PGPR producteurs d'ACC désaminase sont donc capables de réduire la quantité de ce précurseur en conditions de stress, réduisant ainsi la capacité végétale de synthèse des quantités nocives d'éthylène (Desbrosses et al., 2009). Ce processus microbien permet de rétablir l'équilibre hormonal en éthylène (Figure 6) et assure, par conséquent une bonne santé et un bon rendement de la plante (Ghosh et al., 2003).

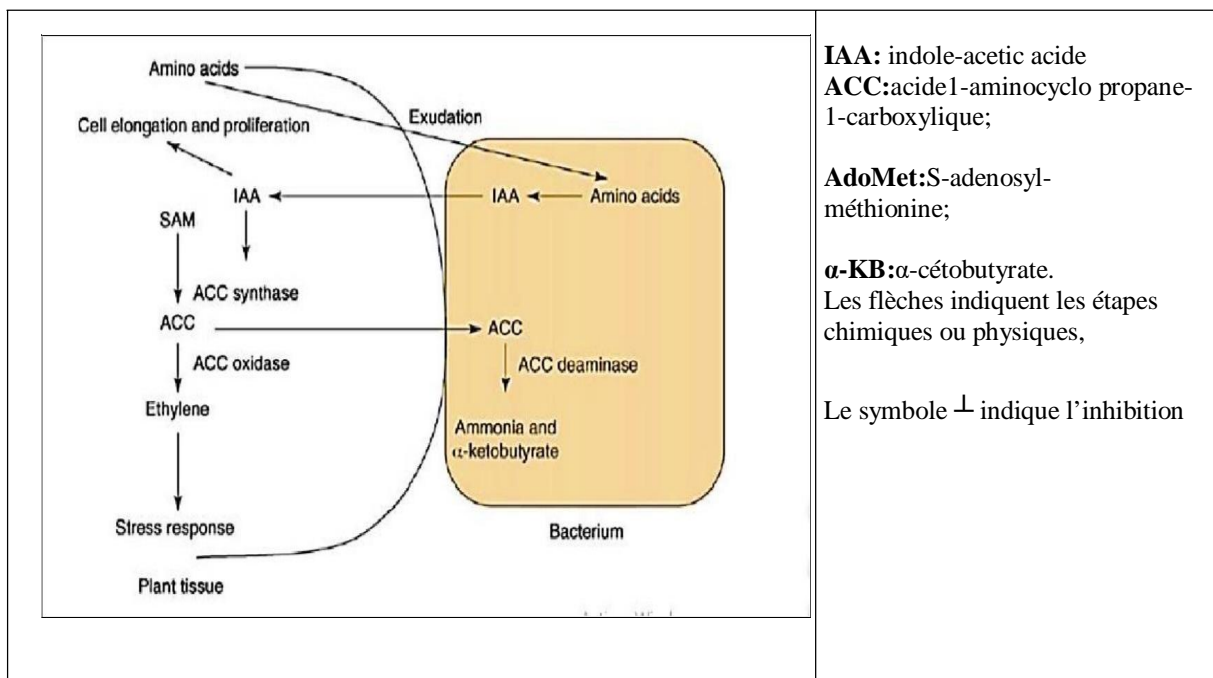


Figure 06: Schéma expliquant l'effet d'une bactérie PGPR sur la diminution de la concentration d'éthylène chez une graine ou une racine (Glick et al.,1999).

II.5.2. Effets phytoprotecteurs des bactéries PGPR

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**).

II.5.2.1. Résistance systémique induite

La résistance systémique induite (**ISR**) est définie comme une amélioration de la capacité défensive de la plante contre un large spectre d'agents pathogènes et de ravageurs ; elle est acquise après une stimulation appropriée (**Seethapathy et al., 2016**).

Il est bien connu que l'induction d'une résistance systémique est un mécanisme par lequel les réseaux de défense des plantes sont activés par les bactéries pour lutter contre l'infection par des agents pathogènes (**Seethapathy et al., 2016**). Parmi les déterminants bactériens qui déclenchent des ISR, il y a des structures cellulaires comme les flagelles et les lipopolysaccharides (**LPS**), les sidérophores et certains antibiotiques. Le **LPS** de *Pseudomonas fluorescens* WCS417a été impliqué dans le déclenchement des **ISR** contre *Pseudomonas syringae* chez les plantes de tomate (**Meziane et al., 2005**).

Les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes telles que *Pseudomonas* spp. Et *Bacillus* spp. ont montré une activité dans la suppression de l'infection fongique. Ils activent de manière systémique les mécanismes de défense latents de la plante contre les agents pathogènes appelés résistance systémique induite. Ce mécanisme fonctionne par l'activation de multiples composés de défense sur des sites éloignés du point d'attaque du pathogène (**Ganesh amoorthi et al., 2008**).

II.5.2.2. Induction d'une résistance systémique acquise (SAR) chez les plantes:

Dans les années 1930, Chester mentionnait déjà la possibilité qu'une « immunité physiologique acquise » puisse exister chez les plantes (**Chester 1933**). Il faudra cependant attendre les années 1960 pour que Ross reprenne ce concept, l'explique et introduise les termes de « résistance locale acquise » et de « résistance systémique acquise » (Ross 1961a, b). Ross sera donc le premier à démontrer qu'un plant de tabac

(*Nicotiana tabacum L.*) initialement infecté avec le virus de la mosaïque du tabac est protégé contre une infection virale subséquente. Dans le même ordre d'idée, d'autres chercheurs apporteront un nouvel éclairage à cette notion en prouvant que cette dernière est efficace non seulement contre l'agent pathogène qui l'a initiée, mais aussi contre une large gamme d'autres agents pathogènes.

L'expression de la RSA implique nécessairement la diffusion du message de stress en direction des tissus sains. Plusieurs molécules, appelées des messagers secondaires, ont été identifiées sans pour autant connaître avec précision leur rôle exact. Par exemple, l'acide salicylique, un composé phénolique de faible poids moléculaire, a longtemps été considéré comme le candidat idéal pour assurer cette signalisation. La RSA contribue donc à l'établissement d'un état de veille permanent qui permet à la plante d'être en alerte en cas d'attaque potentielle et de répondre promptement à l'agression.

Durant la coévolution entre les plantes et les microbes, les agents pathogènes ont acquis la capacité de surmonter la résistance non-hôte par l'injection des protéines effectrices dans les cellules végétales, ce qui annule la **PTI** (PAMP-triggered immunity) et favorise la croissance des pathogènes et le développement de la maladie

Les effecteurs de la RSA ciblent les composants spécifiques de la régulation du système immunitaire basal. Les protéines effectrices sont injectées dans l'apoplaste ou directement dans le cytoplasme des cellules de la plante hôte, menant à une réaction dite : Effector-Triggered Susceptibility (**ETS**).

Lorsque les parasites sont capables de franchir les barrières de la reconnaissance non spécifique, et en réponse à la sécrétion des protéines effectrices, certains cultivars ont développé des protéines de résistance (**R**). Ces protéines reconnaissent des effecteurs particuliers, conduisant à un autre type d'immunité : effector-triggered immunity (**ETI**). Il s'agit d'une reconnaissance spécifique entre les produits du gène de résistance (**R**) dominant chez la plante hôte et les produits du gène d'avirulence (**Avr**) dominant chez le pathogène d'où le concept « gène pour gène » de Flor.

Il s'agit du deuxième niveau de reconnaissance chez les plantes, lorsque les parasites sont capables de franchir les barrières de la reconnaissance non-spécifique. Elle est liée à la détection spécifique de certaines races, appartenant à une espèce de microorganisme pathogène, par certaines variétés, appartenant à une espèce de plante hôte. Selon Flor la résistance spécifique de race et de cultivar ne dépend en général que d'un seul gène dans chaque partenaire.

La reconnaissance **Avr-R** conduit à une réaction d'hypersensibilité (**RH**) au niveau du site d'infection, ce qui isole le pathogène des autres parties de la plante hôte. La HR est une forme de mort cellulaire programmée génétiquement, mise en place de façon très rapide ; cette réaction limite la zone infectée par l'agent pathogène. Deux rôles sont attribués à cette réponse de défense. D'une part, la mort des cellules végétales entourant l'agent pathogène perturbera considérablement le développement de ce dernier. En effet, celui-ci se retrouve dans un milieu dépourvu d'éléments nutritifs, au pH et à une hygrométrie défavorables, et contenant des composés toxiques libérés suite à la mort des cellules. Cependant, ces conditions sont favorables à l'invasion par certains agents pathogènes nécrotrophes comme *Botrytis*.

D'autre part, la HR joue un rôle de signal d'alarme, en informant les autres parties de la plante de l'attaque. Ce signal généré lors de la HR se propage à l'ensemble de la plante, permettant la mise en place de la défense systémique.

La RH donne lieu à une cascade de signaux, activant une résistance générale et non spécifique chez la plante hôte dite systémique, c'est la résistance systémique acquise (Systemic Acquired Resistance, **SAR**). Cette résistance permet à la plante de stimuler ses propres mécanismes de défense et est généralement activée à la suite d'une infection primaire par un agent pathogène nécrotrophe.

II.5.2.3. Competition trophique et spatiale

Un PGPR biocontrôle efficace, par définition, doit être capable de rivaliser pour les nutriments dans la rhizosphère. Ils colonisent de manière compétitive les racines des plantes et stimulent la croissance des plantes et/ou réduisent l'incidence des maladies des plantes (**Haas et Défago, 2005**). Les bactéries envahissent les racines à un stade très précoce par rapport aux champignons qui ont été sélectionnés à un stade plus tardif (**Lauralie, 2020**). L'idée que les rhizobactéries à croissance rapide pourraient surpasser les agents pathogènes fongiques par la compétition pour les sources de carbone et d'énergie, ce qui fournirait une base pour la lutte biologique, est discutée par nombreux auteurs (**Haas et Défago, 2005**). Les actinomycètes est également une source de métabolites bio-actifs, et peut dégrader une large gamme de composés récalcitrants, a donc été recommandé comme une meilleure bio-dégradants. Ils peuvent dégrader les différents types de pesticides et herbicide (**Chaurasia et al., 2018**). Ce sont quelques-unes des caractéristiques qui donnent la priorité à certains micro-organismes pour une colonisation efficace et compétitive des racines des plantes.

La compétition pour les niches racinaires et les déterminants (les nutriments) bactériens implique directement la colonisation racinaire. La surface des racines et la rhizosphère environnante sont des réservoirs de carbone importants. La photosynthèse à cette zone peut atteindre 40%. Ainsi, le long de la surface des racines, il existe diverses niches appropriées, riches en nutriments attirant une grande diversité de micro-organismes, y compris des phytopathogènes. La compétition pour ces nutriments et ces niches est un mécanisme fondamental par lequel le PGPR protège les plantes contre les phytopathogènes. Les PGPR atteignent les surfaces racinaires par une motilité active qui se fait par les flagelles chez les bactéries mobiles et sont guidés par des réponses chimiotactiques (**Stéphane et al., 2005**).

II.5.2.4. Production des antibiotiques

Depuis plusieurs années, diverses espèces bactériennes colonisant les racines de plantes se sont révélées être de puissants agents de lutte biologique contre divers agents phytopathogènes en produisant un ensemble des composés chimiques hétérogènes de faible poids moléculaire (**Thomashow et al., 1997 ; Duffy et al., 2003**). La production des antibiotiques par les microbes est le mécanisme clé de protection contre les maladies méditées par les bactéries solubilisant le phosphate chez les plantes et en particulier celles transmises par le sol et les semences (**Glick et al., 2007 ; Mazurier et al., 2009**).

Les bactéries solubilisant le phosphate telles que les bactéries à Gram négatif, *Pseudomonas fluorescens*, *P. aeruginosa* et *Chromo bacterium violaceum* sécrètent également des antibiotiques (**Taurian et al., 2010**) et assurent la protection des plantes contre les pathogènes transmis par le sol (**Vassilev et al., 2006**). Les antibiotiques sont aussi connus pour leurs activités antiviraux, antimicrobiennes, anti appétantes contre les insectes et les mammifères (**Niranjana et Hariprasad, 2014**).

L'utilisation d'antagonistes microbiens contre les agents pathogènes des plantes dans les cultures agricoles a été proposée comme alternative aux pesticides chimiques. Une méthode de lutte biologique alternative et respectueuse de l'environnement est nécessaire pour lutter contre la maladie ; les PGPR constituent un important groupe de microbes capables de coloniser les racines des plantes (**Hashem et al., 2017**).

Les actinomycètes sont la principale source naturelle de métabolites anti cellulaires (**Karima et al., 2014**). Ils sont connus comme de nobles usines pour la production de nombreux composés biologiquement actifs comme les antibactériens, les antifongiques, les antiviraux, les inhibiteurs enzymatiques (**Ahmad et al., 2017**), les

insecticides, les anti protozoaires et les agents herbicides (**Kekuda ,2013**). Les actinomycètes endophytes résident dans des tissus végétaux sains poursuit et ne produit pas (du moins à court terme) des symptômes évidents d'infection. En raison de leurs rôle, qui favorisent la croissance des plantes hôtes, augmentant la résistance des plantes aux maladies et permettre aux plantes de s'établir le stress ainsi que le niveau de résistance aux insectes et aux mauvaises herbes, les actinomycètes endophytes sont devenus un nouveau type favorable de ressource biologique (**Song et al., 2020**).

II.5.2.5. Production des enzymes lytiques

Les enzymes lytiques telles que les chitinases, les pectinases et les cellulases sécrétées par une variété de microorganismes regroupant des organismes solubilisant le phosphate perturbent la fonctionnalité des agents pathogènes par hydrolyse de chitine, pectine et cellulose respectivement et jouent ainsi un rôle pivot dans la suppression directe des agents phytopathogènes.

(**Ovadis et al., 2004 ; Kim et al., 2008;Khan et al., 2014**) signalent au sujet de la protéase que, les souches bactériennes solubilisant le phosphate et produisant cette enzyme présentent une activité antifongique.

Chapitre III:
Utilisation des PGPR en
agriculture

Chapitre III: Utilisation des PGPR en agriculture**III.1. l'usage des PGPR en agriculture**

L'usage intensif de produits phytopharmaceutiques est désormais sévèrement remis en question et l'usage étendu de variétés génétiquement modifiées est également questionné par de nombreux pays. Le développement de l'usage des PGPR dans l'agriculture se présente donc comme l'une des solutions les plus crédibles qui permettront l'évolution des pratiques agricoles (**Lugtenberg et al., 20002**)

Actuellement, diverses formulations commerciales de PGPR sont en vente. De nombreux groupes ont pu valoriser leur activité de recherche et d'innovation par la mise sur le marché des formulations du type PGPR dans les domaines de la biofertilisation (microorganismes utilisés pour augmenter le rendement), de la phytostimulation (microorganismes utilisés pour stimuler la croissance des plantes) et de la bioprotection (microorganismes utilisés pour inhiber la croissance d'autres microorganismes pathogènes) (**Lugtenberg et al., 20002**).

III.2. Formulation

L'application de l'agent antagoniste en agriculture dans des conditions naturelles qui sont parfois hostiles à son activité, nécessite une optimisation avant l'utilisation, ce qu'on appelle une formulation. En général, c'est une préparation qui contient l'élément actif (dans ce cas le microorganisme ou ses spores), la substance support inerte et les adjuvants qui sont des substances nutritives et/ou chimiques qui protègent l'élément actif contre les facteurs environnementaux (**Hynes et Boyetchko, 2006**). D'autres substances sont recommandées pour améliorer l'effet de la formulation elle que la chitine (**Bharathi et al., 2004; Gerding-Gonzalez et al., 2007**).

Certains microorganismes s'adaptent bien avec la formulation et son application. Ainsi, à titre d'exemple, les bacilles supportent mieux les conditions environnementales que les autres bactéries par leur pouvoir de former des endospores (**Raaijmakers et al., 2002; Cavaglieri et al., 2005**). La formulation doit être bien connue compte tenu du temps et de l'espace de son utilisation qui sont en fonction de l'agent de biocontrôle, le pathosystème et l'itinéraire technique de la culture (**Fravel, 2005**).

Certaines formulations sont déjà connues pour répondre à plusieurs objectifs d'application avec une combinaison entre plusieurs agents actifs de la même nature ou de natures

différentes. Celle-ci donne généralement de bons résultats sur des plantes cultivées sous serre et en plein champ face aux variables conditions (**Raupach et Kloepper, 1998; Guetsky et al., 2002; Senthilraja et al., 2010**). Alors que d'autres formulations plus récentes sont efficaces et répondent à plusieurs objectifs en contenant un seul agent actif (**Qingyun et al., 2011**).

Les formulations des PGPR peuvent être sous forme de poudre sèche à base de talc, ou de tourbe (**Okont Labandera Gonza'lez, 1994; Kishore et al., 2005**), ou de Kaolin (argile) (**Hynes et Boy et chko, 2006**), appliquées sur les feuilles (**Marrone, 1999**); comme elles peuvent être sous forme liquide (**Vendan et Thangaraju, 2006**) qui se caractérise par une durée de vie relativement longue, de plus d'une année (**Vendan et Thangaraju, 2007; Kolombet et al., 2008**). Elles ne développent pas de contaminations et offrent plus de protection contre les stress et plus d'efficacité d'application en plein champ (**Hegde, 2002; Vendan et Thangaraju, 2006**) telle que la possibilité d'application en système d'irrigation.

Actuellement, on utilise l'encapsulation qui permet de protéger l'agent actif des facteurs environnementaux assurant ainsi une durée d'action plus prolongée par une libération progressive de la matière active (**Martinez-Viveros et al., 2010**); ceci est d'autant plus maîtrisé par la technologie de la nano formulation (**Perez-de-Luquet Rubiales, 2009**). Les travaux de (**Remya et al., 2010**) ont abouti à l'innovation d'un nanoherbicide efficace dans le but de réduire la phytotoxicité des plantes cultivées.

III.2.1. Utilisation des PGPR en formulation de biofertilisants

Certaines souches de PGPR ont été exploitées à une échelle commerciale comme des inoculums destinés à l'application en agriculture tant que biofertilisants. Néanmoins, l'étude de leurs effets sur la structure des communautés microbiennes de la rhizosphère demeure en cours d'investigation (**Deacon, 1991**). *Pseudomonas fluorescens* est la première PGPR à avoir fait l'objet de formulation à base de talc et à être utilisée comme un biofertilisateur sur la semence de la pomme de terre dans l'objectif de promouvoir la croissance (**Kloepper et Schroth, 1981**). Plusieurs recherches ont confirmé les potentialités des PGPR tant que biofertilisateurs de plusieurs cultivars stratégiques en plein champ (**Baldani et al., 2000; Kennedy et Islam, 2001; Islam et al., 2009**). Le groupe diazotrophique des PGPR permet la fixation de l'azote atmosphérique à l'instar de la relation symbiotique des légumineuses (**Choudhury et Kennedy, 2004**). En générale, les souches de *Pseudomonas fluorescens* offrent le plus de potentialités d'utilisation comme biofertilisants et biopesticides (**Dubeikovsky et al., 1993; Raupach et Kloepper, 1998**).

III.2.1.1. Quelques rhizobactéries utilisées comme biofertilisant

Un nombre croissant de recherches et d'études porte sur la gestion du système sol-végétal et micro-organismes. Il s'agit de recherches encouragées et développées dans le cadre de nombreux projets internationaux. Elles ont permis notamment l'identification et la sélection de différents genres de rhizobactéries, telles que l'*Azospirillum* (Krieg et Döbereiner, 1984), *Raoultella* (Van Elsas *et al.*, 2007) et *Bacillus* (Siddiqui, 2006).

Le but de ces recherches est de développer des bioengrais sous forme sèche et d'obtenir une concentration bactérienne nécessaire pour améliorer la croissance des plantes.

Le **tableau 06** montre l'effet de l'utilisation des rhizobactéries sur l'augmentation de la croissance et de la protection aux maladies chez les plantes.

Tableau 06 : effet de l'utilisation des rhizobactéries

Rhizobactéries	Culture	Effet	Références
<i>Pseudomonas fluorescense</i>	Betterave	Meilleure résistance aux maladies	Moenne-Locco et al., 1999
<i>Bacillus pumilus</i>	Tomate	Meilleure résistance aux maladies	Benhamou et al., 1998
<i>Bacillus subtilis</i>	Riz	Promotion de la Croissance des plantes	Vasudevan et al., 2002
<i>Azospirillum brasilense</i>	Blé	Promotion de la croissance des plantes	Kim et al., 2005
<i>Pseudomonas fluorescense</i>	Blé	Promotion de la croissance des plantes	de Freitas et Germida, 1992

Par exemple, *Pseudomonas* spp. libère dans le sol l'enzyme phytase. Cette enzyme est responsable de la libération du phosphate, tel que l'inositol hexaphosphate. Dans des essais pratiqués au Québec (Canada) en champ ouvert, l'inoculation *Pseudomonas* spp. a généré une augmentation du rendement du champ de maïs étudié. Dans un autre essai, ce même rhizobactérie a permis une augmentation du rendement des cultures de laitue de 18% (Smith, 1995).

III.2.2. Utilisation des PGPR en formulation de biopesticides

Un biopesticide est défini comme étant un produit qui contient un microorganisme ou un de ses produits naturels capables de lutter contre les phytopathogènes (**Thakore,2006**). Pendant ces dernières années, l'industrie des biopesticides a connu une nette progression, au moment où l'utilisation des pesticides a régressé (**Bailey et al ., 2010**).

Selon (**Cook,R.J.,1993**), l'inoculation des plantes au niveau de la rhizosphère par les microorganismes ayant un effet d'antagonisme contre les agents pathogènes et un pouvoir de coloniser la rhizosphère est un moyen efficace de biocontrôle. A cette fin ,plusieurs formulations de PGPR ont été développées dont la première est la bioformulation à base de talc de la souche Pfl de *Pseudomonas fluorescens*, utilisée contre la pourriture des racines du pois chiche (**Vidhyasekaran et Muthamilan, 1995**).

Malgré les effets bénéfiques des biopesticides, ils présentent, néanmoins, certains inconvénients. Ainsi, ils sont parfois moins efficaces que les pesticides chimiques (**Shishkoff et Mc Grath,2002**) étant tributaires des conditions du milieu (température, sol ,humidité, plante hôte, pH, etc.) (**Larkin et Fravel, 2002; Mendoza et al., 2003**). La sélection des agents antagonistes est longue et coûteuse (**Fravel,2005**). L'obtention des formulations est difficile pour les agents sporulants ou non sporulants (**Hjeljord et al.,2000;Collins et Jacobsen,2003**). (**Campbell, R., 1994**), suggère que l'utilisation des agents des biopesticides peut ne pas être aussi efficace que les autres méthodes de lutte, mais généralement elle est encouragée pour des raisons environnementales.

III.3.Des limites à l'usage de PGPR

Le problème le plus important qui rend le succès de l'implantation des PGPR incertain en agriculture provient de leur inconstance à promouvoir la croissance des plantes.

Cette variabilité peut s'expliquer par les facteurs biotiques et abiotiques affectant la survie et les effets des PGPR dans la rhizosphère. Il est donc important de comprendre les premières étapes de l'établissement de l'association PGPR-plante afin d'optimiser les succès de la colonisation racinaire et l'expression du principe actif (**Beauchamp, 1993**).

L'usage de bactéries non sporulantes nécessite la mise en place de toute une logistique en circuit court afin de pouvoir apporter un inoculum vivant et métaboliquement actif sur le lieu d'inoculation, afin de garantir de bonnes conditions de stockage et d'application.

Le deuxième point réside dans la difficulté réelle que représente la constitution d'un dossier permettant de mener des expérimentations en conditions de plein champ. Il s'agit d'une procédure longue, difficile et coûteuse qui peut décourager le développement de nouveaux

produits. En outre, avant de pouvoir obtenir une Autorisation de Distribution pour Expérimentation (**ADE**), le déposant doit fournir la preuve de l'innocuité du microorganisme pour la santé humaine. Or, de nombreuses souches microbiennes ayant un rôle bénéfique au sein de la rhizosphère peuvent présenter des risques pour des patients immunodéprimés et jouer un rôle dit d'opportuniste dans l'apparition de pathologies secondaires (**Berg et al., 2005**).

Il apparaît en effet que certains mécanismes permettant l'interaction entre la bactérie et son hôte végétal sont similaires à ceux mis en place dans le cadre d'une interaction pathogène avec l'homme notamment pour certaines souches appartenant aux genres *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Serratia*, *Staphylococcus*, *Stenotrophomonas*, etc. (**Rahme et al. 1995**)

d'après (**Berg et al., 2005**). Heureusement, les nombreux travaux de taxonomie entrepris ces dernières années ont pu, grâce à l'évolution des techniques de génomique, donner une meilleure appréciation des distances génétiques qui existent au sein d'un même genre, entre espèces pathogènes et phyto-bénéfiques. Nous verrons plus tard avec *Burkholderia* que la distance est parfois telle qu'il semble indispensable de devoir reconsidérer les « périmètres » de certains genres.

III.4. Commercialisation des biofertilisants:

Actuellement, diverses formulations commerciales de PGPR sont en vente. Des formulations bactériologiques de *Rhizobium spp.* sont disponibles dans plusieurs pays afin de favoriser la nodulation des légumineuses et de diminuer la fertilisation azotée des cultures. La formulation Zea-nit Plus est en vente en Italie. Il s'agit d'un inoculum à base d'*Azospirillum sp.* développé pour inoculer le maïs. De même, la formulation Quantum 4000, à base de *Bacillus subtilis*, est commercialisée aux États-Unis pour lutter contre le *Rhizoctoniasolani Kühn* chez l'arachide, le haricot et le coton. Depuis 1985 En Chine, des PGPR qui accroissent les rendements sont utilisées dans plusieurs cultures (**Beauchamp, 1993**).

Berg (2009) présente la liste d'un certain nombre d'inoculums commercialisés dans le monde et leurs applications (**Tableau 07**).

Tableau 07 : Liste de quelques inoculants utilisant des microorganismes PGPR, commercialisés dans le monde (Berg, 2009)

Table 1 Representatives of microbial inoculants

Microorganisms	Name of the product	Plants, pathogens, or pathosystems	Company
<i>Ampelomyces quisqualis</i> M-10	AQ10 Biofungicide	Powdery mildew on apples, cucurbits, grapes, ornamentals, strawberries, and tomatoes	Ecogen
<i>Azospirillum</i> spp.	Biopromoter	Paddy, millets, oilseeds, fruits, vegetables, sugarcane, banana	Manidharma Biotech
<i>Bacillus subtilis</i> FZB24	FZB24 li, TB, WG RhizoPlus	Potatoes, vegetables, ornamentals, strawberries, bulbs, turf, and woods	AbiTep
<i>Bacillus subtilis</i> strain GB03	Kodiak	Growth promotion; <i>Rhizoctonia</i> and <i>Fusarium</i> spp.	(Gustafson); Bayer CropScience
<i>Bacillus pumilus</i> GB34	YieldShield	Soil-borne fungal pathogens	(Gustafson); Bayer CropScience
<i>Bacillus subtilis</i> QST716	Serenade	Tobacco, tomato, lettuce, spinach	AgraQuest
<i>Bacillus subtilis</i> GB03, other <i>B. subtilis</i> , <i>B. licheniformis</i> , and <i>B. megaterium</i>	Companion	<i>Rhizoctonia</i> , <i>Pythium</i> , <i>Fusarium</i> , and <i>Phytophthora</i>	Growth Products
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	Soil implant+	Soy bean	Nitragin
<i>Coniothyrium minutans</i>	Contans WG, Intercept WG	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i> , <i>S. minor</i>	Prophyta Biologischer Pflanzenschutz
<i>Delftia acidovorans</i>	BioBoost	Canola	Brett-Young Seeds Limited
<i>Paecilomyces lilacinus</i>	Bioact WG	Nematodes	Prophyta Biologischer Pflanzenschutz
<i>Phlebiopsis gigantea</i>	Rotex	<i>Heterobasidium annosum</i>	E-nema Biologischer Pflanzenschutz
<i>Pseudomonas chlororaphis</i>	Cedomon	Leaf stripe, net blotch, <i>Fusarium</i> sp., sot blotch, leaf spot, etc. on barley and oats	BioAgri AB
<i>Pseudomonas fluorescens</i> A506	BlightBan A506	Frost damage, <i>Erwinia amylovora</i> , and russet-inducing bacteria on almond, apple, peach, pear, etc.	NuFarm
<i>Pseudomonas trivialis</i> 3Re-27	Salavida	Lettuce	Sourcon Padena
<i>Pseudomonas</i> spp.	Proradix	<i>Rhizoctonia solani</i>	Sourcon Padena
<i>Serratia plymuthcia</i> HRO-C48	RhizoStar	Strawberries, oilseed rape	Prophyta Biologischer Pflanzenschutz
<i>Streptomyces griseoviridis</i> K61	Mycostop	<i>Phomopsis</i> spp., <i>Botrytis</i> spp., <i>Pythium</i> spp., <i>Phytophthora</i> spp.	Kemira Agro Oy
<i>Trichoderma harzianum</i> T22	RootShield, PlantShield T22, Planter box	<i>Pythium</i> spp., <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Fusarium</i> spp.	Bioworks

Conclusion

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

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

Références bibliographique:

Abecassis J. Vermeersch G., 2006. Influence de l'évolution des technologies de production et de transformation sur la qualité des aliments, *Rapport de l'Académie des Technologies*, 47p.

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.

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.

Anonyme, 2020. Les céréales, culture essentielle de l'alimentation, Jardin & Binette

<https://jardinage.lemonde.fr/dossier-1519-cereales-culture-essentielle-alimentation.html>

Aouali, S. et Douici-Khalfi A. 2009. Recueil des principales maladies fongiques des céréales en Algérie. ITGC. pp. 10–25.

Bais H.P., Weir T.L., Perry L.G., Gilroy S., Vivanco, J.M., 2006. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annu. Rev. Plant Biol.*, **57**: 233-266.

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.

Baldani, V.L.D., Baldani, J.I., Döbereiner, J., 2000. Inoculation of rice plants with the endophytic diazotrophs *Herbaspirillum seropedicae* and *Burkholderia* spp. *Biology and Fertility of Soils* **30**, 485-491

Barriuso J, Solano BR, Fray RG, Camara M, Hartmann A, Manero FJG. (2008). Transgenic tomato plants alter quorum sensing in plant growth-promoting rhizobacteria. *Plant. Biotechnol. J.* **6**: 442-452.

Behl, R. K., Ruppel, S., Kothe, E., Narula, N. – 2012 - Wheat x *Azotobacter* x VA Mycorrhiza interactions towards plant nutrition and growth—a review. *Journal of Applied Botany and Food Quality* **81**, 95-109.

Belaid D., 1986. Aspects de la céréaliculture algérienne, éd. Office des Publications Universitaires, Alger, Algérie, 207p.

Benhacene Z., Messiad I et Slimane BL. Évaluation et taxonomie numérique des bactéries promotrices des plantes isolées de rhizosphère du *Capsicum annuum* (Master dissertation, Université 8 Mai 1945 Guelma Université). 2016.

Berge O., 2011. Écologie des populations bactériennes associées aux eucaryotes

Beyer, S., Daba, S., Tyagi, P., Bockelman, H., Brown-Guedira, G., Mohammadi, M. – 2019 - Loci and candidate genes controlling root traits in wheat seedlings—a wheat root GWAS. *Functional & Integrative Genomics* **19**, 91-107.

Bharathi, R., Vivekananthan, R., Harish, S., Ramanathan, A., Samiyappan, R., 2004. Rhizobacteria-based bioformulations for the management of fruit rot infection in chillies. *Crop Protection* **23**, 835-843.

Bouziani, M., 2007. L'usage immodéré des pesticides. De graves conséquences sanitaires. Le guide de la médecine et de la santé. *Revue Santé Maghreb*, 27-35p.

Bozzini A., 1988. Origine Distribution and Production of *durum* wheat in the world, In:

Campbell,R.,1994. Biological control of soil-borne diseases: some present problems and different approaches. *Crop Protection* 13,4-13.

Cantin J, 1998. Effets des apports d'engrais minéraux phosphatés dans les démarreurs à maïs-grain en complément des apports de phosphore provenant des engrais de ferme selon la saturation en phosphore des sols . Journée du salon de l'agriculteur, bien nourrir le sol c'est mieux gérer le phosphore. p. 4-1 à 4-8.

Choudhury,A.T.M.A.,Kennedy,I.R.,2004.Prospects and potentials for systems of biological nitrogen fixation. *Biology and Fertility of Soils* 39, 219-227.

Clarke J.M., Norvell W.A., Clarke F.R. et Buckley T.W., 2002. « Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenic du rumlines. » In : Can J.(Editeur), *Plant Sci. /Revue canadienne de phytotechnie*, 82:27-33

Clerget Y., 2011. Biodiversité des céréales origine et évolution, *Société d'Histoire Naturelle*, Pays de Montbéliard, 16p.

Codou-David G., 2018. Blés anciens et modernes : une histoire de plus de 10 000 ans,*Revue scientifique Bourgogne-Franche-Comté Nature*, vol.27, 39p.

Collins,D.P.,Jacobsen,B.J.,2003.Optimizing a *Bacillus subtilis* isolate for biological control of sugar beet Cercospora leaf spot. *Biological control* 26 (2),153-161.

Combes-Meynet, E., Pothier, J. F., Moëgne-Loccoz, Y., Prigent-Combaret, C. – 2011 - The Pseudomonas secondary metabolite 2,4-diacetylphloroglucinol is a signal inducing rhizoplane expression of Azospirillum genes involved in plant-growth promotion. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 24, 271-284.

Cook,R.J., 1993.Making greater use of introduced microorganisms for biological-control of plant-pathogens. *Annual Review of Phytopathology* 31,53-80.

Couillerot, O., Combes-Meynet, E., Pothier, J. F., Bellvert, F., Challita, E., Poirier, M. A., Rohr, R., Comte, G., Moëgne-Loccoz, Y., Prigent-Combaret, C. – 2011 - The role of the antimicrobial compound 2,4-diacetyl phloro glucinol in the impact of biocontrol Pseudomonas fluorescens F113 on Azospirillum brasilense phytostimulators. *Microbiology* 157, 1694-1705.

Creus, C. M., Sueldo, R. J., Barassi, C. A. – 2004 - Water relations and yield in Azospirillum-inoculated wheat exposed to drought in the field. *Canadian Journal of Botany* 82, 273-281.

Deacon, J.W., 1991. Significance of ecology in the development of biocontrol agents against soil-borne plant pathogens. *Biocontrol Science and Technology* 1, 5-20.

delivery to plants. *Plant Science* 179, 154-163.

Dimkpa CO, Merten D, Svatos A, Buchel G, Kothe E. (2009).Metal-induced oxidative stress impacting plant growth in contaminated soil alleviated by microbial siderophores. *Soil Biol. Biochem.* 41: 154-162.

Djellout H., Mekheldi D., Belkacem KK., Raio A et Krimi Z. Evaluation de potentiel de souche antagoniste de *Bacillus* spp. et de *pseudomonas* spp. Dans le contrôle d'*agrobacterium* spp. Pathogène impliqué dans la maladie de galle de collet. *Revue Agrobiologia*. 2019 ; 9(1): 1267-1283.

Drogue, B., Sanguin, H., Chamam, A., Mozar, M., Llauro, C., Panaud, O., Prigent-Combaret C., Picault N., Wisniewski-Dyé, F. – 2014 - Plant root transcriptome profiling reveals a strain-dependent response during *Azospirillum-ric* cooperation. *Frontiers in Plant Science* 5, 607.

Dubeikovskiy, A.N., Mordukhova, E.A., Kochethov, V.V., Polikarpova, F.Y., Boronin, A.M., 1993. Growth promotion of black currants of wood cuttings by recombinant strain *Pseudomonas fluorescens* BSP53 synthesizing an increased amount of indole-3-acetic acid. *Soil biology and soil biochemistry* 25, 1277-1281.

Erhart D., 2016. Le blé et le pain de la ferme de la soulevure, éd. Fédération Artisans du Monde & Canopé, France, 20p.

Fabriani G. et Lintas C. (Editeurs), *durum: Chemistry and Technology*, AACC(Minnesota), États-Unis, pp.1-16.

Feillet P., 2000. Le grain de blé : composition et utilisation, éd. Inra, Paris, France, 308p.

Feliachi, K. 2002. Programme de développement de la céréaliculture en Algérie. ITGC. El Harrach. Alger.

Fok. (2015). Factors influencing the adoption of innovation in agriculture in Algeria. Case of two strategic crops: durum wheat and potato. *Cach Agric.* Volume 29.

Fravel, D.R., 2005. Commercialization and implementation of biocontrol. *Annual Review of Phytopathology* 43, 337-359.

Fritas, S., 2012. Etude bioécologique du complexe des insectes liés aux cultures céréalières dans la région de Batna (Algérie). Mémoire de magistère : Ecologie et biologie des populations. Tlemcen. 115p.

Fuchs J.G., Herisse J.M., 1999- Fertilité des sols: Les produits biologiques: bien les connaître pour mieux les utiliser. *biophysica*. pp. 17-33. 41 p. gestion durable des sols. *La Grande Muraille Verte*, IRD Éditions, pp. : 369-376.

Ghitri I. Caractérisation du potentiel PGP de la flore *Bacillus cereus* isolée du sol. (Master dissertation, Université de Tlemcen). 2018.

Glick BR. (2003). Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnol. Adv.* 21: 383-393.

Gobat JM., Aragno M., Matthey W. Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols (Vol. 14). PPUR Presses polytechniques. 2010.

Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2003- Le sol vivant: Bases de pédologie et Biologie des sols. Edition: Presses Polytechniques et universitaires romandes. Lausanne Coll. Gérer l'environnement, no 14, 2^{ème} édition. 569 p.

Guetsky, R., Elad, Y., Shtienberg, D., Dinoor, A., 2002. Establishment, survival and activity of the biocontrol agents *Pichia guillermondii* and *Bacillus mycoides* applied as a mixture on strawberry plants. *Biocontrol Science and Technology* 12, 705-714.

Hakeem K R., Mahmood I., Imadi S.R., Shazadi K., Gul A., 2016: Plant, soil and Microbes: Implication in crop science Effects of pesticides on environment, volume 1., Ed . Springer international publishing, Switzerland.

Références bibliographique

- Hamadache, A., Abdellaoui, Z. et Aknine M. 2010.** Facteurs agro techniques d'amélioration de la productivité du blé dur en Algérie. Cas de la zone sub-humide. Revue Semestrielle 10 : 5-18.
- Hegde,S.V.,2002.**Liquid biofertilizers in Indian agriculture. Biofertilizer News Letters **12**,17-22.
- Henrotte B., 2016.** Transformation des céréales, *Itinéraires BIO*, Biowallonie, N°16,Namur, Belgique, 59p.
- Heulin T. & Achouak W., 2012.** Les rhizobactéries productrices d'exopolysaccharides et la
- Hjeljord,L.G.,Stensvand,A.,Tronsmo,A.,2000.** Effect of temperature and nutrient stress on the capacity of commercial *Trichoderma* products to control *Botrytis cinerea* and *Mucor piriformis* in green houses strawberries. Biological Control 19 (2), 149-160.
- Hynes,R.K., Boyetchko, S.M.,2006.**Research initiatives in the art and science of biopesticide formulations. Soil Biology and Biochemistry **38**, 845-849.
- Iseli-trösch K., 2019.** Les céréales suisses, *Agence d'information agricole romande(AGIR)*, Lausanne, Suisse, 15p.
- Islam,Md.,Madhaiyan,M.,Hari,P.,Deka,B.,Woojong,Y.,Gillseung,L.,Saravanan,V.S.,Qingling,F.,Hongqing,H.,Tongmin,S.,2009.**Characterization of plant growth promoting traits of free-living diazotrophic bacteria and their inoculation effects on growth and nitrogen up take of crop plants. Journal of Microbiology and Biotechnology **19** (10), 1213-1222
- Kellou., 2008.** Analyse du marché Algérien du blé et les opportunités d'exportation pour les céréaliers français dans le cadre du pole de compétitivité, le cas des coopératives Sud céréales, groupe coopératif Occitan et Aude coop. Thèse de master of science du CIHEAM- IAMM n°93.
- Kennedy,I.R.,Islam,N.,2001.** The current and potential contribution of a symbiotic nitrogen fixation to nitrogen requirements on farms. Australian Journal of Experimental Agriculture **41**,447-457.
- Khakipour N., Khavazi K., Mojallali H., Pazira E et Asadirahmani H.** Production of auxin hormone by *fluorescent pseudomonas*. Am Eurasian J Agric Environ Sci. 2008; 4(6), 687-692.
- Kheddam-Benadjal, N., 2012.** Enquête sur la gestion des pesticides en Algérie et recherche d'une méthode de lutte alternative contre *Meloido gyneincognita* (Nematoda : Meloidogynidae). Mémoire de magistère : Département Zoologie Agricole. El Harrach – Alger. 87p.
- Kishore,G.K.,Pande,S.,Podile,A.R.,2005.** Phyllo plane bacteria in crease seed ling emergence growth and yield of field-grown ground nut (*Arachishypogea* L.).Letters in Applied Microbiology **40**,260-268.
- Klopper,J.W.,Schroth,M.N.,1981.**Plant growth promoting rhizobacteria and plant growth under genotobiotic conditions. Phytopathology **71**,642-644.
- Kolombet,L.V.,Zhigletsova,S.K.,Kosarava,N.I.,Bystron,E.V.,Derbyshev,V.V.,Krasonosa,S.P.,Schiler,D., 2008.**Development of extended shelf life of liquid formulation of the bio fungicide *Trichoderma asperellum*. World Journal of Microbiology and Biotechnology**24**, 123-131.
- Kuzmicheva, Y. V., Shaposhnikov, A. I., Petrova, S. N., Makarova, N. M., Tychinskaya, I. L., Puhalsky, J. V., Parahin, N. V., Tikhonovich, I. A., Belimov, A. A. – 2017 –** Variety specific relation ships between effects of rhizobacteria on root exudation, growth and nutrient up take of soybean. Plant and Soil 419, 83-96.

Kwon, Y. S., Lee, D. Y., Rakwal, R., Baek, S. B., Lee, J. H., Kwak, Y. S., Seo, J. S., Chung, W. S., Bae, D. W., Kim, S. G. – 2016 - Proteomic analyses of the interaction between the plant-growth promoting rhizobacterium *Paeni bacillus polymyxa* E681 and *Arabidopsis thaliana*. *Proteomics* 16, 122-135.

Larkin, R.P., Fravel, D.R., 2002. Effects of varying environmental conditions on biological control of *Fusarium* wilt of tomato by non pathogenic *Fusarium* spp. *Phytopathology* 92 (11), 1160-1166.

Louchahi M. 2015. Enquête sur les conditions d'utilisation des pesticides en agriculture dans la région centre de l'algérois et la perception des agriculteurs des risques associés à leur utilisation. Diplôme de magistère, école national supérieur d'agronomie, Algérie, 104p.

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.

Lugtenberg, B. J. J., Chin-A-Woeng, T. F. C., Bloemberg, G. V. (2002) Microbe-plant interactions: principles and mechanisms. *Antonie van Leeuwenhoek* 81 (1-4) : 373-383.

Maalem A., Sansri D. Activité anti-phytopathogènes de quelques souches rhizosphériques appartenant aux groupes des *actinomycètes* filamenteux et des *Pseudomonas* spp *fluorescents*. (Master dissertation, Université 8 Mai 1945 Guelma). 2018 ; 22p.

Maketon, C., Fortuna, A. M., Okubara, P. A. – 2012 - Cultivar-dependent transcript accumulation in wheat roots colonized by *Pseudomonas fluorescens* Q8r1-96 wild type and mutant strains. *Biological Control* 60, 216-224.

Manske, G. G. B., Behl, R. K., Luttger, A. B., Vlek, P. L. G. – 2000 - Enhancement of mycor rhizal infection, nutrient efficiency and plant growth by *Azotobacter* in wheat: Evidence of varietal effects. In Narula, N. (ed), *Azotobacter in Sustainable Agriculture*. CBS Publishers, New Delhi, India. pp. 136-47.

Manske, G. G. B., Behl, R. K., Luttger, A. B., Vlek, P. L. G. – 2000 - Enhancement of mycor rhizal infection, nutrient efficiency and plant growth by *Azotobacter* in wheat: Evidence of varietal effects. In Narula, N. (ed), *Azotobacter in Sustainable Agriculture*. CBS Publishers, New Delhi, India. pp. 136-47.

Martínez-Viveros O., Jorquera M.A., Crowley D.E., Gajardo G. & Mora M.L., 2010.

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. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 10, 293-319.

Mechanisms and Practical Considerations Involved in Plant Growth Promotion by

Melakhessou, Z., 2018. Effet compétitif des principales mauvaises herbes sur les caractères morphologiques et agronomiques de blé dur (*Triticum durum* Desf.) Dans la région de Biskra. *Courrier du savoir*. n°26. 59-66p.

Mendoza, G., Martijnten Hoopen, R.A., Kass, G., Sanchez Garita, D.C.J., Krauss, U., 2003. Evaluation of mycoparasites as biocontrol agents of *Rosellinia* root rot in cocoa. *Biological Control* 27(2), 210-227.

Moule C., 1971. Céréales, Phytotechnie Spéciale II, éd. La maison rustique, Paris, 94p.

Multignerl., 2005 : Effets retardés des pesticides sur la santé humaine, Environnement, Risques & Santé, vol. 4 No.3, Université de Rennes.

Okon, Y., Labanderagonzalez, C. A. (1994). Agronomic applications of Azospirillum-an evaluation of 20 years world wide field inoculation. *SoilBiol. Biochem.* 26: 1591-1601.

Perez-de-Luque,A.,Rubiales, D.,2009. Nano technology for parasitic plant control. Pest Management Science **65**,540-545.

Pérez-Jaramillo, J. E., Mendes, R., Raaijmakers, J. M. – 2016 - Impact of plant domestication on rhizosphere microbiome as ssembly and functions. Plant Molecular Biology 90, 635-644.

phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms.

photosynthétiques: de la rhizosphère à la phycosphère. INRA-PACA. Unité de Pathologie

Pilon-Smits E. (2005).Phyto remediation. Ann. Rev. *Plant Biol.* 66: 948-955.

Plant Soil, **321**: 305-339.

Qingyun,Z.,Caixia,D.,Xingming,Y.,Xinlan,M.,Wei,R.,Qirong,S.,Yangchun,X.,2011. Biocontrol of Fusarium wilt disease for *Cucumismelo* melon using bio-organic fertilizer. Applied Soil Ecology **47**,67-75.

Quénéa K. Étude structurale et dynamique des fractions lipidiques et organiques réfractaires de sols d'une chronoséquence forêt/maïs (Cestas, sud-ouest de la France) (Doctoral dissertation, Université de Paris 6 France) 2004.

Raaijmakers,J.M.,Vlami,M.deSouza,J.T.,2002.Antibiotic production by bacterial biocontrol agents. Antonievan Leeuwenhoek **81**(1-4), 537-547.

Ramade. 2005. Eléments d'écologie : écologie fondamentale. DUNOD, Paris, 3ème édition, pp864.

Raupach,G.S.,Kloepper,J.W.,1998.Mixtures of plant growth promoting rhizobacteria enhance biological control of multiple cucumber pathogens. Phytopathology **88**,1158-1164.

Raupach,G.S.,Kloepper,J.W.,1998.Mixtures of plant growth promoting rhizobacteria enhance biological control of multiple cucumber pathogens. Phytopathology **88**,1158-1164.

Remya,N.,Saino,H.V.,Baiju,G.N.,Maekawa,T.,Yoshida,Y.,Sakthi,K.D.,2010.Nano particulate material Rhizobacteria. *J. SoilSci. Plant Nutr.* **10** (3): 293 – 319.

Richardson A., Barea J-M., McNeill A. &Prigent-Combaret C., 2009. Acquisition of

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

RogerP.,GarciaJ.L.,2001- Introduction à la microbiologie du sol.Polycopié de cours. Université de Provence, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Luminy. 193 p.

Shishkoff,N.,McGrath,M.T.,2002.AQ10 biofungicide combined with chemical fungicides or Add Qspray adjuvant for control of cucurbit powdery mildew in detached leaf culture. Plant Disease **86**, 915-918.

Terré S., Asch F., Padham J., Sikora R. A., Becker M. (2007). Influence of root zone bacteria on root iron plaque formation in rice subjected to iron toxicity, p. 446. In: Tielkes, E. (ed), Utilisation of diversity in land use systems: sustainable and organic Approaches to Meet Human Needs., legume in osarum bv. Viciae, Appl. *Soil Ecol.* 17: 97-105.

Thakore,Y.,2006.The biopesticide market for global agricultural use. Industrial Biotechnology **2**, 194-208.

Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M. L., Touraine, B., Moëgne-Loccoz, Y., Muller, D., Legendre, L., Wisniewski-Dyé, F., Prigent-Combaret, C. – 2013 - Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Frontiers in Plant Science* 4, 356.

Végétale UR407, 83 p.

Vendan, R. T., Thangaraju, M., 2006. Development and standardization of liquid formulation for *Azospirillum* bioinoculant. *Indian Journal of Microbiology* 46, 379-387.

Vendan, R. T., Thangaraju, M., 2007. Development and standardization of *Azospirillum* bioinoculant. *Acta Microbiologica Immunologica Hungarica* 54 (2), 167-177.

Venieraki, A., Dimou, M., Pergalis, P., Kefalogianni, I., Chatzipavlidis, I., Katinakis, P. – 2011 - The genetic diversity of culturable nitrogen-fixing bacteria in the rhizosphere of wheat. *Microbial Ecology* 61, 277-285.

Veresoglou, S. D., Menexes, G. – 2010 - Impact of inoculation with *Azospirillum* spp. on growth properties and seed yield of wheat: a meta-analysis of studies in the ISI Web of Science from 1981 to 2008. *Plant and Soil* 337, 469-480.

Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant soil* 255: 571-586.

Vidhyasekaran, P., Muthamilan, M., 1995. Development of formulations of *Pseudomonas fluorescens* for control of chick pea wilt. *Plant Disease* 79, 782-786.

Walker, V., Bertrand, C., Bellvert, F., Moëgne-Loccoz, Y., Bally, R., Comte, G. – 2011 - Host plant secondary metabolite profiling shows a complex, strain-dependent response of maize to plant growth-promoting rhizobacteria of the genus *Azospirillum*. *New Phytologist* 189, 494-506.

Whipps, J. M. (2001) Microbial interaction and biocontrol in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*, 52, 487-511.

Zhang, H., Kim, M. S., Sun, Y., Dowd, S. E., Shi, H., Paré, P. W. (2008). Soil bacteria confer plant salt tolerance by tissue-specific regulation of the sodium transporter HKT1. *Mol. Plant Microbe Interact.* 21: 737-744.