



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : SCIENCES

DEPARTEMENT : SCIENCES AGRONOMIQUES

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Benalia Nawal

DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE (SNV)

FILIERE : SCIENCES AGRONOMIQUES

OPTION : PROTECTION DES VEGETAUX

Thème

**Essai de formulation de biofongicide à base
des spores d'actinobactéries symbiotiques
de genre « *Streptomyces* »**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
KADDOURI Mohamed Amine	Maître Assistant "A"	Président
ALLALI Khadidja	Maître Assistant "A"	Examinatrice
ZAMOUM Miyada	Maître de Conférences "A"	Rapporteur
BOUKAYA Nassira	Maître Assistant "B"	Co-rapporteur

Promotion : juin 2019



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



جامعة عمار ثلجي - الأغواط

كلية/معهد: العلوم
قسم: علوم الفلاحة

مذكرة ماستر

تقديم الطالبة: بن علية نوال

ميدان: علوم الطبيعية و الحياة

شعبة: علوم الفلاحة

تخصص: حماية النباتات

موضوع البحث

اختبار صياغة مبيدات الفطريات الحيوية باستعمال عزلات
أكتينوبكتيريا التكافلية ذات جنس "*Streptomyces*"

أعضاء لجنة المناقشة:

الاسم و اللقب	الدرجة العلمية	الصفة
قدوري محمد أمين	أستاذ المساعد "أ"	رئيسا
علالي خديجة	أستاذة المساعدة "أ"	ممتحنة
زعموم ميادة	أستاذة محاضرة "أ"	مقررا
بوقاية نصيرة	أستاذة المساعدة "ب"	مقررا مساعدا

الدفعة: جوان 2019

Table des matières	Page
Résumé.....	I
Abstrac.....	II
ملخص.....	III
Dédicace.....	IV
Remerciements.....	V
Liste des tableaux.....	VI
Liste des figures.....	VII
Liste des abréviations.....	IX
Introduction.....	01
Partie I. Synthèse bibliographique.....	03
I.1.Plante hôte : blé dur.....	03
I.1.1. Historique.....	03
I.1.2. Classification botanique.....	03
I.1.3. Importance économique.....	04
I.1.3.1. Dans le monde.....	04
I.1.3.2.En Algérie.....	05
I.1.4. Caractéristiques morphologiques de la plante.....	05
I.1.5. Cycle de développement.....	07
I.1.6. Contraintes phytosanitaires.....	08
I.2.Maladies : pourriture racinaire.....	09
I.2.1. Agent pathogène « <i>Fusarium culmorum</i> ».....	09
I.2.2. Caractères morphologiques.....	09
I.2.3. Position systématique.....	10
I.1.4. Cycle de développement.....	10
I.2.5. Symptomatologie.....	11
I.2.6. Moyens de lutte.....	12
I.2.6.1. Lutte culturale.....	12
I.2.6.2. Lutte génétique.....	13
I.2.6.3. Lutte chimique.....	13
I.2.6.4. Lutte biologique.....	13
I.3. Actinobactéries.....	14

I.3.1. Généralités.....	14
I.3.2. Taxonomie.....	16
I.3.3. Cycle biologique.....	16
I.3.4. Importance des actinobacteries.....	17
I.3.4.1. En biotechnologie.....	17
I.3.4.2. Dans le domaine agronomique.....	17
I.3.5. Ecologie des actinobacteries.....	18
I.3.6. Interaction actinobactéries-plante.....	19
I.3.7. Utilisation des actinobactéries en lutte biologique.....	19
I.3.7.1. Mécanismes impliqués dans le biocontrôle.....	19
I.3.7.1.1. Activité antagoniste.....	19
I.3.7.1.2. Production des enzymes lytiques.....	20
I.3.7.1.3. Production des sidérophores.....	20
I.3.7.1.4. Production de l'acide cyanhydrique (HCN).....	21
I.3.7.1.5. Induction de la résistance systémique.....	21
I.3.7.2. Mécanismes impliqués dans l'effet <i>PGPB</i>	21
I.3.7.2.1. Solubilisation des phosphates inorganiques.....	21
I.3.7.2.2. Production de l'ammoniaque.....	22
I.3.7.2.3. Production des phytohormones.....	22
I.3.8. Formulation des biofongicides à base des spores d'actinobactéries.....	23
Partie II. Matériel et méthodes.....	24
II.1. Matériel biologique.....	24
II.1.1. Blé dur.....	24
II.1.2. Agent phytopathogène.....	24
II.1.3. Agent de biocontrôle.....	24
II.2. Méthodes études.....	25
II.2.1. Repiquage et conservation des microorganismes.....	25
II.2.1.1. Isolats fongiques.....	25
II.2.1.2. Isolats d'actinobactéries.....	25
II.2.2. Test d'antibiose.....	25
II.2.3. Test du Pouvoir colonisateur racinaire.....	26
II.2.3.1. Désinfection superficielle des grains de blé dur.....	26
II.2.3.2. Semis des grains de blé dur	27

II.2.3.3. Préparation des suspensions de spores.....	28
II.2.3.4. Bactérisation des plantules du blé dur.....	29
II.2.3.5. Transplantation des plantules du blé dur dans la perlite.....	39
II.2.3.6. Re-isollement des actinobactéries.....	30
II.2.4. Sélection des isolats d'actinobactéries performants.....	30
II.2.5. Formulation des biofongicides à base des spores d'actinobactéries Sélectionnés.....	30
II.2.5.1. Préparation des suspensions de spores d'actinobactéries.....	30
II.2.5.2. Formulation des biofongicide en poudre de talc.....	31
II.2.6. Test d'efficacité <i>in vivo</i> des biofongicides formulés.....	
II.2.6.1. Stérilisation du sol et conditionnement des pots.....	31
II.2.6.2. Infection du sol par les spores de <i>Fusarium culmorum</i>	31
II.2.6.3. Méthode d'application des biofongicides et traitements des grains de blé dur..	31
II.2.6.4. Traitements retenus et conduite de l'essai.....	32
II.2.6.5. Paramètres mesurées.....	33
➤ Incidence de pourriture racinaire sur les plantules du blé dur.....	33
➤ Effet PGPB des biofongicides appliqués sur les plantules du blé dur...	33
✓ Longueur racinaire et longueur des tiges.....	33
✓ Poids frais.....	33
✓ Poids sec.....	34
➤ Paramètres physiologiques.....	34
✓ Dosage de la proline.....	34
✓ Dosage de la chlorophylle.....	34
Partie III. Résultats et discussion.....	35
III.1. Test d'antibiose.....	36
III.2. Test du pouvoir Colonisateur des racines.....	36
III.3. Formulation des biofongicide.....	37
III.3.1. Efficacité <i>in vivo</i> des biofongicides formulés.....	38
III.3.2. Effet PGPB.....	40
III.3.3. Paramètres physiologiques.....	42
Conclusion.....	45
Références bibliographiques.....	47

Thème : Essai de formulation de biofongicide à base des spores d'actinobactéries symbiotiques.

Résumé :

Ce travail a pour objectif d'évaluer l'efficacité de huit isolats d'actinobactéries du genre *Streptomyces*, dans la lutte biologique contre le champignon phytopathogène *Fusarium culmorum* qui cause la pourriture racinaire de blé dur. L'ensemble des isolats d'actinobactéries ont été testées *in vivo* pour leur activité antifongique et leur pouvoir colonisateur des racines. Les huit isolats ont été testés pour évaluer l'effet *PGPB* dans la promotion de la croissance des plantules de blé dur et les paramètres physiologiques, comparativement au fongicide chimique (*Dividend*®) et biofongicide (*Sérénade*®).

La majorité des isolats ont inhibé la croissance mycélienne de *F. culmorum*, et tous les isolats ont la capacité de coloniser le système racinaire des plantules de blé dur.

Les isolats SN2 et ZL2 se sont avérées très prometteuses dans la promotion de la croissance des plantules de blé dur, et ont montré les meilleurs résultats de biocontrôle de *F. culmorum* et une diminution de l'incidence de la maladie. Ils ont améliorés les teneurs en pigments chlorophylliens et la teneur en proline des plantules de blé dur.

Les résultats de ce travail montrent que les biofongicides à base des spores des isolats *Streptomyces* sp. SN2 et *Streptomyces* sp. ZL2 qui sont formulées en poudre de talc, ont une efficacité de biocontrôle et l'effet *PGPB* ce qui permet de suggérer leur utilisation en lutte biologique.

Mots clé : Actinobactérie, biocontrôle, *Streptomyces*, pourriture racinaire, blé dur, *PGPB*, *Fusarium culmorum*.

Memory title: Biofungicide formulation test based on symbiotic actinobacterial spores.

Abstract:

The objective of this work is to evaluate the efficacy of eight isolates of actinobacteria of the genus *Streptomyces* in the biological control of the phytopathogenic fungus *Fusarium culmorum*, which causes root rot in durum wheat. All of the actinobacteria isolates were tested *in vivo* for their anti fungal activity and root-colonizing power, as well as for evaluating the *PGPB* effect in promoting durum wheat plant growth and physiological parameters, compared with chemical fungicide (*Dividend®*) and biofungicide (*Sérénade®*).

The majority of isolates inhibit mycelial growth of *F. culmorum*, and all isolates have the ability to colonize the root system of durum wheat seedlings.

The SN2 and ZL2 isolates were found to be very promising in promoting the growth of durum wheat seedlings, and showed the best biocontrol results of foulmouthed and a decrease in the incidence of the disease, and improved the contents in chlorophyll pigments and the proline content of durum wheat seedlings.

The results of this work show that spore-based biofungicides of *Streptomyces* sp. SN2 and *Streptomyces* sp. ZL2 which are formulated in talcum powder, have biocontrol efficiency and the *PGPB* effect, which makes it possible to suggest their use in biological control.

Keywords: Actinobacteria, biocontrol, *Sterptomyces*, root rot, durum wheat, *PGPB*, *Fusarium culmorum*.

بن علي نوال

عنوان المذكرة : اختبار صياغة مبيدات الفطريات الحيوية باستعمال عزلات أكتينوبكتيريا التكافلية.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو تقييم فاعلية ثماني عزلات من الأكتينوبكتيريا من جنس *Streptomyces* في مكافحة البيولوجية' للمرض تعفن الجذر في قمح الصلب الذي يسببه فطر *Fusarium culmorum* .

تم اختبار جميع العزلات و ذلك لتقييم نشاطها المضاد للفطريات و قدرتها على استعمار الجذور ' وكذلك لتقييم تأثير *PGPB* في تعزيز نمو نبات القمح الصلب مقارنة مع مبيدات الفطريات الكيميائية (*Dividend®*) والمبيدات الحيوية (*Sérénade®*) .

تمنع أغلبية العزلات نمو الفطر *F. culmorum* ، وجميع العزلات لديها القدرة على استعمار النظام الجذري لشتلات القمح الصلب.

تم العثور على عزلتي SN2 و ZL2 المحفزة في تعزيز نمو شتلات القمح الصلب، وأظهرت أفضل نتائج مكافحة الحيوية و انخفاض في نسبة حدوث المرض، وتحسين المحتويات في أصباغ الكلوروفيل ومحتوى البرولين لشتلات القمح الصلب .

تظهر نتائج هذا العمل أن المبيدات الحيوية المستندة إلى الأبواغ للبكتريا *Streptomyces* sp. SN2 و *Streptomyces* sp. ZL2 التي يتم صياغتها في بودرة التلك ، لها كفاءة في التحكم البيولوجي وتأثير *PGPB*، مما يجعل من الممكن اقتراح استخدامها في مكافحة البيولوجية.

الكلمات المفتاحية: الاكتينوبكتيريا' المراقبة البيولوجية' *Streptomyces* 'التعفن الجذري' القمح الصلب' *Fusarium culmorum*, *PGPB*

Remerciements

*Avant tout, nous remercions **ALLAH** le tout puissant, pour nous avoir donné la santé, la patience, la volonté et le courage pour réaliser ce travail.*

الحمد لله

Je voudrais remercier du fond du cœur l'enseignante Mme. **GOUDJAL ZAMOUM M.** Maitre de Conférences "A" à l'Université de Laghouat, pour avoir accepté d'encadrer ce travail, et pour son encouragement durant toute ma carrière, ainsi que l'orientation, la confiance, la gentillesse et son ouverture d'esprit.

Mes remerciements s'adressent également à Mlle. **BOUKAYA NASSIRA**, pour m'avoir tendus la main pour la réalisation de ce travail.

Et je remercie le président Mr. **KADDOURI MOHAMED AMINE**, d'avoir présidé le jury, et je remercie l'examinatrice Mme. **ALLALI KHADIDJA**, d'avoir accepté d'examiner mon mémoire.

Je voudrais remercier tous les enseignants du département d'agronomie à l'Université Amar TELIDJI DE Laghouat. Un grand respect à vous.

Merci aux ingénieurs du laboratoire de Département d'Agronomie pour leur aide et soutien.

J'adresse également mes remerciements à toutes les personnes qui, de diverses façon et à tout moment, m'ont apporté leur aide, surtout **KHIALI BKHAITA** et tout mes amis et collègues de la promotion de 2^{ème} année Master « protection des végétaux » pour leur encouragements et leur amitié.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.



Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents qui m'ont encouragé à donner le meilleur de moi-même, et qui m'ont fourni les moyens d'être ce que je suis aujourd'hui. Surtout ma très chère Maman, ma source de tendresse, ma lumière, un gros merci pour toi, merci pour tout ce que tu as fait pour moi. Une mère très adorable.

« Tout le poids de l'or du monde n'est rien en comparaison de l'amour d'une mère et d'un père ».

*Je le dédie aussi à mes sœurs Bouchra, Ikram et Habiba et mes frères Khaled, Rabeh et Hamza.
Que dieu les garde tous.*

Je le dédie à ma belle-famille « BENADJILA » un gros merci pour votre aide à moi

*Surtout Mon cher époux MOUAD
Tu me soutiens fortement dans un moment de faiblesse
Merci de vos aides et toute conforté qui vous avez m'a fourni
pour achever ce modeste travail
Et Merci pour votre soutien moral*

*A toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont apportée
leur aide.*

A tous, du fond de mon cœur je vous dédie ce travail.

B. Nawal



Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents qui m'ont encouragé à donner le meilleur de moi-même, et qui m'ont fourni les moyens d'être ce que je suis aujourd'hui. Surtout ma très chère Maman, ma source de tendresse, ma lumière, un gros merci pour toi, merci pour tout ce que tu as fait pour moi. Une mère très adorable.

« Tout le poids de l'or du monde n'est rien en comparaison de l'amour d'une mère et d'un père ».

*Je le dédie aussi à mes sœurs Bouchra, Ikram et Habiba et mes frères Khaled, Rabeh et Hamza.
Que dieu les garde tous.*

Je le dédie à ma belle-famille « BENADJILA » un gros merci pour votre aide à moi

*Surtout Mon cher époux MOUAD
Tu me soutiens fortement dans un moment de faiblesse
Merci de vos aides et toute conforté qui vous avez m'a fourni
pour achever ce modeste travail
Et Merci pour votre soutien moral*

*A toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont apportée
leur aide.*

A tous, du fond de mon cœur je vous dédie ce travail.

B. Nawal

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
01	Origine d'isolement des souches d'actinobactéries	25
02	Champignons cibles utilisés pour étudier l'activité antifongique	25
03	Activité antifongique des souches d'actinobactéries selon la méthode des stries croisées.	35

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
01	Origine d'isolement des souches d'actinobactéries	25
02	Champignons cibles utilisés pour étudier l'activité antifongique	25
03	Activité antifongique des souches d'actinobactéries selon la méthode des stries croisées.	35

Liste des figures

N°	Titre de la figure	Page
01	Marché mondial de blé dur (Crystel, 2014).	04
02	Production algérienne des céréales lors de la campagne. DSASI	05
03	Morphologie d'un plant de blé .1-Fleur de blé ; 2-Etamine ; 3-Pistils 4-grain de blé ; 5- Racines du blé. (Anonyme 2).	06
04	Schéma représentant le cycle de vie du blé dur (Trail, 2010).	08
05	Schéma représentatif la morphologie de <i>Fusarium culmorum</i> . Ch, chlamydospore; Cp, conidiophore, Mc, macroconidie. (D'après Champion,1997).	10
06	Symptômes de la fusariose observés chez le blé dur (D'après Agrios, 2005).	12
07	Différentes chaînes de spores chez les actinobactéries (Breton et al, 1989).	15
08	Cycle de développement des <i>Streptomyces</i> sur milieu solide (Hopwood et al., 1985).	17
09	Graines de blé dur de la variété Vitron (Originale, 2019).	24
10	Schéma représentant la méthode des stries croisées (Originale, 2019).	26
11	Photographies représentant la méthode de la désinfection superficielle des grains du blé dur (Originale, 2019).	27
12	Culture des grains de blé dur dans le phytotron (Originale, 2019).	28
13	Méthode de préparation des suspensions des spores d'actinobactéries (Originale, 2019).	28
14	Trempe des racines dans les suspensions des spores des actinobactéries testés.	29
15	Transplantation des plantules de blé dur dans la perlite stérile.	29
16	Photographie montrant le découpage des racines des plantules de blé dur.	30
17	Traitements des graines du blé dur par le Sérénade®, le Dividend® et par le biofongicide formulé (Originale, 2019).	32
18	Photographes montrant une partie du dispositif expérimental et le semer des grains de blé dur traitées (Originale, 2019).	33
19	Photographier montrant l'activité antagoniste d'isolat <i>Streptomyces</i> sp. SN2 vis-à-vis de trois champignons phytopathogènes cibles (Originale, 2019).	36
20	A. La croissance des actinobactéries ré-isolées des racines des plantules de blé dur sur milieu ISP2. B. Plantule de blé dur sain inoculé artificiellement par l'actinobactérie endophyte SN2.	37
21	Photographie montrant la poudre de talc d'isolat <i>Streptomyces</i> sp. SN2.	37

22	Pourriture racinaire observés sur les plantules de blé dur après 6 semaines de culture.	38
23	Histogramme représente l'incidence de la pourriture racinaire de blé dur causée par <i>Fusarium culmorum</i> .	4
24	Promotion de la croissance des plantules du blé dur par les biofongicides formulés. (A) : en poudre de talc à base des spores d'isolat SN2, (B) : en poudre de talc à base des spores d'isolat ZL2 et (C) le témoin négatif (Originale, 2019).	40
25	Effet de biofongicide formulé à base de spores de <i>Streptomyces</i> sp. SN2 et <i>Streptomyces</i> sp. ZL2 sur le promotion de la longueur racinaire (A), la longueur des tiges (B), le poids frais (C), et le poids sec (D) des plantules de blé dur cultivées en sol stérilisé et en sol non stérilisé.	41
26	Effet des traitements de biofongicides formulés et les traitements retenus sur la teneur en chlorophylle des plantules de blé dur.	43
27	Effet des traitements de biofongicides formulés et les traitements retenus sur la teneur en proline des plantules de blé dur.	44

Liste des figures

N°	Titre de la figure	Page
01	Marché mondial de blé dur (Crystel, 2014).	04
02	Production algérienne des céréales lors de la campagne. DSASI	05
03	Morphologie d'un plant de blé .1-Fleur de blé ; 2-Etamine ; 3-Pistils 4-grain de blé ; 5- Racines du blé. (Anonyme 2).	06
04	Schéma représentant le cycle de vie du blé dur (Trail, 2010).	08
05	Schéma représentatif la morphologie de <i>Fusarium culmorum</i> . Ch, chlamydospore; Cp, conidiophore, Mc, macroconidie. (D'après Champion,1997).	10
06	Symptômes de la fusariose observés chez le blé dur (D'après Agrios, 2005).	12
07	Différentes chaînes de spores chez les actinobactéries (Breton et al, 1989).	15
08	Cycle de développement des <i>Streptomyces</i> sur milieu solide (Hopwood <i>et al.</i> , 1985).	17
09	Graines de blé dur de la variété Vitron (Originale, 2019).	24
10	Schéma représentant la méthode des stries croisées (Originale, 2019).	26
11	Photographies représentant la méthode de la désinfection superficielle des grains du blé dur (Originale, 2019).	27
12	Culture des grains de blé dur dans le phytotron (Originale, 2019).	28
13	Méthode de préparation des suspensions des spores d'actinobactéries (Originale, 2019).	28
14	Trempe des racines dans les suspensions des spores des actinobactéries testés.	29
15	Transplantation des plantules de blé dur dans la perlite stérile.	29
16	Photographie montrant le découpage des racines des plantules de blé dur.	30
17	Traitements des graines du blé dur par le Sérénade [®] , le Dividend [®] et par le biofongicide formulé (Originale, 2019).	32
18	Photographes montrant une partie du dispositif expérimental et le semer des grains de blé dur traitées (Originale, 2019).	33
19	Photographier montrant l'activité antagoniste d'isolat <i>Streptomyces</i> sp. SN2 vis-à-vis de trois champignons phytopathogènes cibles (Originale, 2019).	36
20	A. La croissance des actinobactéries ré-isolées des racines des plantules de blé dur sur milieu ISP2. B. Plantule de blé dur sain inoculé artificiellement par l'actinobactérie endophyte SN2.	37
21	Photographie montrant la poudre de talc d'isolat <i>Streptomyces</i> sp. SN2.	37

22	Pourriture racinaire observés sur les plantules de blé dur après 6 semaines de culture.	38
23	Histogramme représente l'incidence de la pourriture racinaire de blé dur causée par <i>Fusarium culmorum</i> .	4
24	Promotion de la croissance des plantules du blé dur par les biofongicides formulés. (A) : en poudre de talc à base des spores d'isolat SN2, (B) : en poudre de talc à base des spores d'isolat ZL2 et (C) le témoin négatif (Originale, 2019).	40
25	Effet de biofongicide formulé à base de spores de <i>Streptomyces</i> sp. SN2 et <i>Streptomyces</i> sp. ZL2 sur le promotion de la longueur racinaire (A), la longueur des tiges (B), le poids frais (C), et le poids sec (D) des plantules de blé dur cultivées en sol stérilisé et en sol non stérilisé.	41
26	Effet des traitements de biofongicides formulés et les traitements retenus sur la teneur en chlorophylle des plantules de blé dur.	43
27	Effet des traitements de biofongicides formulés et les traitements retenus sur la teneur en proline des plantules de blé dur.	44

Liste des abréviations

%	Pourcent
ADN	Acide désoxyribonucléique
AG3	Acide gibbérellique 3
AIA	Acide indole-3-acétique
ANOVA	Analyse de variance
ARNr 16S	Acide ribonucléique codant pour la sous unité ribosomique 16S
°C	Degré Celsius
CH₃COOH	d'acide acétique
C₆H₆O₄	ninhydrine
cm	Centimètre
DO	Densité optique
H₃PO₄	d'acide ortho phosphorique
H	Humidité
h	heur
ha	hectare
HCN	Acide cyanhydrique
ISP2	International <i>Streptomyces</i> Project 2
ISR	Résistance systémique induite
g	Gramme
Kg	Kilogramme
min	Minute
mg	Milligramme
ml	Millilitre
mm	Millimètre
Mt	Million de tonnes
N°	Numéro
N₂	Azote gazeux
nm	Nanomètre
PDA	Potato Dextrose agar
pH	Potentiel Hydrogène
PGPB	<i>Plant- Growth-Promoting bacteria</i>
qu	Quinton
T	Température
UFC /ml	Unité formant colonie par millilitre

Liste des abréviations

%	Pourcent
ADN	Acide désoxyribonucléique
AG3	Acide gibbérellique 3
AIA	Acide indole-3-acétique
ANOVA	Analyse de variance
ARNr 16S	Acide ribonucléique codant pour la sous unité ribosomique 16S
°C	Degré Celsius
CH₃COOH	d'acide acétique
C₆H₆O₄	ninhydrine
cm	Centimètre
DO	Densité optique
H₃PO₄	d'acide ortho phosphorique
H	Humidité
h	heur
ha	hectare
HCN	Acide cyanhydrique
ISP2	International <i>Streptomyces</i> Project 2
ISR	Résistance systémique induite
g	Gramme
Kg	Kilogramme
min	Minute
mg	Milligramme
ml	Millilitre
mm	Millimètre
Mt	Million de tonnes
N°	Numéro
N₂	Azote gazeux
nm	Nanomètre
PDA	Potato Dextrose agar
pH	Potentiel Hydrogène
PGPB	<i>Plant- Growth-Promoting bacteria</i>
qu	Quinton
T	Température
UFC /ml	Unité formant colonie par millilitre

INTRODUCTION

INTRODUCTION

A l'échelle mondiale, les céréales occupent une place primordiale dans le système agricole (Slama *et al.*, 2005). Elles constituent les plantes les plus cultivées au monde de point de vue superficie et volume récolté (Pastre et Rosa, 1993). Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) occupe près de 17% des terres cultivées (Laegreid *et al.*, 1999; USDA, 2013). Selon la FAO, l'Algérie a réalisé une récolte record de 3,9 millions de tonnes (Mt) sur la campagne 2017/2018, soit une hausse de 61% de la production, dont 3,15 Mt de blé dur (FAOSTAT, 2018).

La culture de blé est sujette à de nombreuses attaques parasitaires par une gamme assez large de ravageurs et maladies cryptogamiques qui occasionnent des pertes de rendement jusqu'à 30% (Rastoin et Benabderrazik, 2014). Parmi les agents phytopathogènes qui causent beaucoup de dégâts aux cultures, les champignons responsables de la pourriture racinaire telles que *Fusarium culmorum* (Singh *et al.*, 1994).

Afin de préserver les cultures céréalières des fusarioses causées par *F. culmorum*, la lutte chimique est la plus utilisée pour contrôler ces maladies par l'utilisation des fongicide (Reis et Carmona, 2013). En effet, l'utilisation abusive des produits chimiques, actuellement en vigueur, ne peut avoir que des conséquences néfastes sur l'environnement à travers, la pollution de la nappe phréatique et la présence des résidus toxiques dans les aliments pouvant nuire à la santé humaine. De plus, l'usage massif des pesticides chimiques induit le développement de résistances chez les agents pathogènes, ce qui engendre leur inefficacité (Bouizgarne, 2013; Jain *et al.*, 2013).

La lutte biologique par l'utilisation de microorganismes (bactéries, levures, champignons, virus) antagonistes ou des substances naturelles connaît un regain d'intérêt grandissant, en raison des risques potentiels de la lutte chimique (Bouizgarne, 2013; Jain *et al.*, 2013). Une alternative intéressante serait l'utilisation des propriétés antimicrobiennes des actinobactéries qui sont des microorganismes omniprésents dans le monde et dans les écosystèmes algériens (Sabaou *et al.*, 1998; Kitouni *et al.*, 2005; Boudemagh *et al.*, 2005; Meklat *et al.*, 2012; 2013). Ces bactéries sont capables de produire de nombreux métabolites ayant des structures chimiques et des activités biologiques très diverses (Berdy 2005; Solecka *et al.*, 2012). A cet égard, de nombreux travaux ont rapporté que ces microorganismes seraient efficaces contre diverses maladies végétales (El-Tarabily et Sivasithamparam 2006; Bouizgarne 2013).

Par ailleurs, plusieurs isolats de *Streptomyces* provenant des sols sahariens ont déjà montré leur utilisation potentielle comme agents de biocontrôle des agents phytopathogènes (Loqman *et al.*, 2009; Yekkour *et al.*, 2012; Goudjal *et al.*, 2013, 2014).

L'objectif de notre travail est d'étudier l'efficacité d'une collection de huit (8) isolats d'actinobactéries du genre *Streptomyces* sp. dans la lutte biologique contre la pourriture racinaire du blé dur causée par *F. culmorum*, et de mettre en évidence leurs propriétés antagonistes *in vitro* sur la croissance mycélienne de l'agent phytopathogène. Les huit isolats d'actinobactéries ont été testé pour leur efficacité *in vivo* dans la promotion de la croissance de plantules de blé dur (*Triticum durum* Defs), les même isolats ont été utilisé pour la formulation des biofongicides à base des isolats d'actinobactéries performants sous forme de poudre de talc, en comparaison avec les traitements couramment utilisés Sérénade® et Dividend®.

Partie I :

Synthèse bibliographique

Partie I. Synthèse bibliographique

I.1.Plante hôte : blé dur

I.1.1. Historique

La découverte du blé remonte à 15000 ans avant Jésus-Christ dans la région du croissant fertile, vaste territoire comprenant, la vallée du Jourdain et des zones adjacentes de Palestine, de la Jordanie, de l'Iraq, et la bordure Ouest de l'Iran (Feldman et Sears, 1981 ; Mouellef, 2010). C'était à une époque où l'homme pratiquait déjà la cueillette et faisait ses débuts comme agriculteur. Cette période coïncidait avec un épisode climatique sec, aboutissant à l'arrêt du mode de vie de "chasseur-cueilleur", et engendrant la domestication progressive des plantes, associée à la création des premières communautés villageoises (Wadley et Martin, 1993).

L'espèce de cette époque lointaine, le *Triticum monococcum* L, est un des ancêtres des blés actuels. Le genre *Triticum*, se subdivise, en fonction du niveau de ploïdie, en trois groupes: diploïde, tétraploïde et hexaploïde, avec respectivement 14, 28 et 42 chromosomes (Sakamura, 1918 ; Harlan, 1971). Ces trois groupes sont représentés, respectivement, par *Triticum monococcum* L., *Triticum turgidum* ssp *durum* L. et *Triticum aestivum* L. Le génome de ces espèces est organisé en une série basique de 7 chromosomes (X = 7 chromosomes), qui, au cours de l'évolution, a gardé une certaine homologie, malgré la spéciation chez la famille des *Poaceae* (Ahn *et al.*, 1993).

Le croisement spontané du *Triticum monococum* sauvage et *Aegylops speltoides*, a permis l'apparition du blé dur *Triticum diccoides* qui en suit progressivement évalués vers *Tritucum turgidum*ssp *dicoccum* puis vers *Triticum durum* ou blé dur cultivé (Rosalind et Sears, 1967).

I.1.2. Classification botanique

Le blé dur est une plante annuelle, monocotylédone, appartenant à la famille des *Poaceae*. La classification du blé dur, selon Brouillet *et al.*, (2006) est la suivante :

Embranchement	Spermaphytes
S/Embranchement	Angiospermes
Classe	Monocotylédones
Super Ordre	Commeliniflorales
Ordre	Poales
Famille	Poaceae
Genre	<i>Triticum</i>

Espèce *Triticum durum* Desf

I.1.3. Importance économique

I.1.3.1. Dans le monde

Le blé dur (*T. durum*) occupe, à l'échelle mondiale, une place primordiale dans le système agricole. Il est considéré comme une principale source de l'alimentation humaine et animale (Slama *et al.*, 2005). Il assure 15% des besoins énergétiques (Bonjean et Picard, 1990), et il est considéré aussi comme une très grande ressource de protéines et d'hydrate de carbones (Monneveux, 2002). En outre, ses sous-produits (paille) servent d'aliments pour le bétail. Le blé est cultivé principalement dans les pays du bassin méditerranéen à climat arides et semi-arides. Ces régions se caractérisent par l'augmentation de la température couplée à la baisse des précipitations, en plus de la désertification et la sécheresse (Nadjemkamel, 2012).

Cependant, on peut constater que les principaux pays exportateurs du blé dur sont : le Canada, les Etats-Unis, l'Union Européen (80 % des parts de marchés) et le Mexique. Par ailleurs, les principaux pays importateurs sont : l'Algérie, l'Italie et le Maroc (pays méditerranéens : 2/3 des échanges mondiaux) (Crystel, 2014) (Figure 01). Leurs importations augmentent régulièrement, en relation avec une production déficitaire et parfois irrégulière, et une population en hausse (Renaud, 2014).

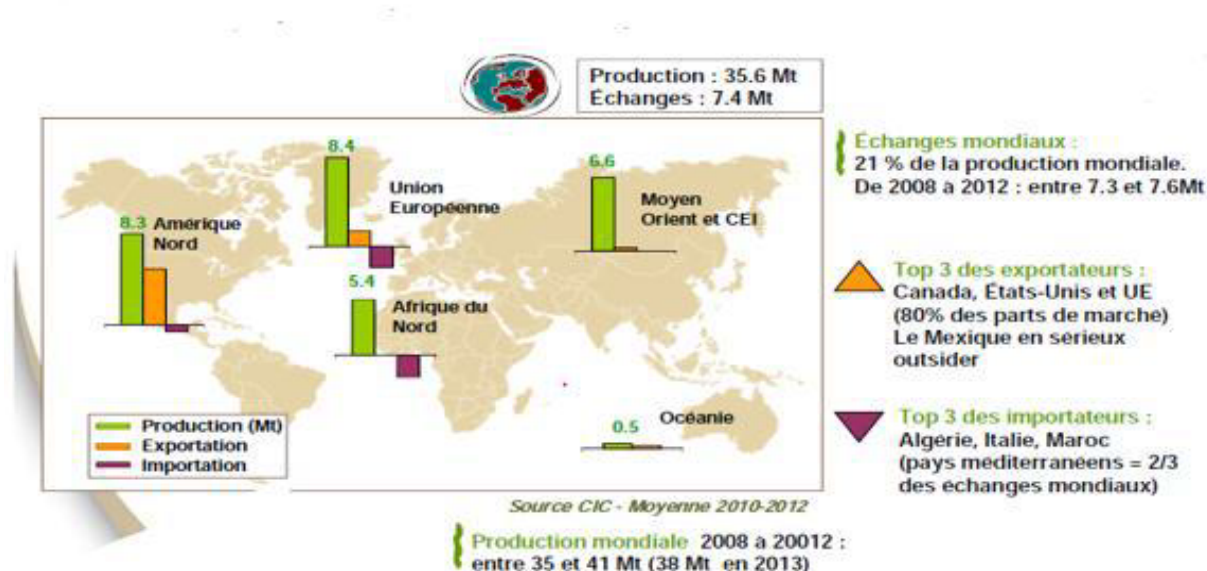


Figure 01. Marché mondial de blé dur (Crystel, 2014).

I.1.3.2. En Algérie

En Algérie la céréaliculture constitue la principale activité agricole, notamment dans les zones arides et semi-arides. Les terres annuellement emblavées représentent 3,6 millions d'hectares. La superficie occupée par le blé dur est en moyenne de 1,3 millions d'hectares, durant la période 2000-2010 (MADR, 2011). L'importance des superficies occupées par cette espèce, comparativement à la superficie occupée par l'orge, est influencée par le prix à la production garanti par l'Etat. Ces prix sont de 4500, 3500 et 2500 DA respectivement pour le blé dur, le blé tendre et l'orge (Figure 2).

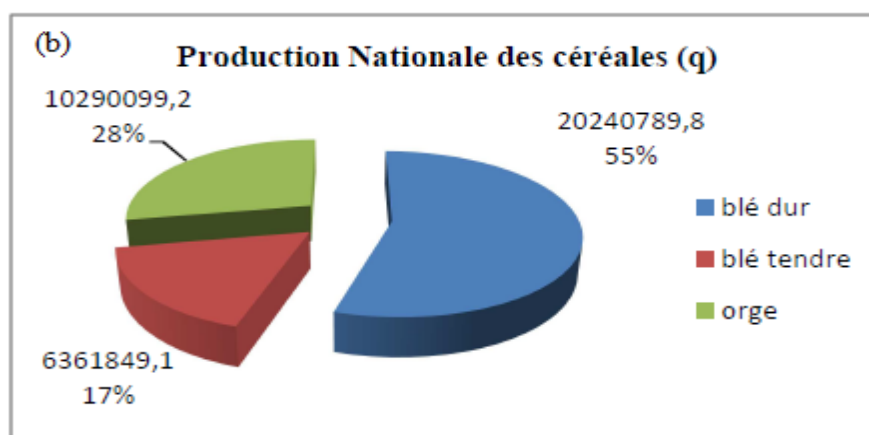


Figure 02. Production algérienne des céréales lors de la campagne 2013/2014.

I.1.4. Caractéristiques morphologiques

Il s'agit d'une graminée annuelle de hauteur moyenne (Bozzini, 1988), dont l'appareil végétatif comporte un appareil racinaire et un appareil aérien (Figure 03).

Le système racinaire est de type fasciculé qui résulte de la succession de deux systèmes au cours du développement de la plante :

- Système primaire (racines séminales) : ce système de racines fonctionne de la germination à la ramification de la plante c'est-à-dire au tallage. Ces racines sont d'origines embryonnaires cependant associés dans le grain aux différentes parties de l'embryon qui selon (Grignac, 1965) sont :

- Une racine principale résultant de l'allongement de la radicule.
- Deux paires de racines latérales.
- Une racine épiblastique.

- Système secondaire (racines adventives) : c'est un système de racines coronaires ou système de racines de tallage. Il se forme dès le tallage et se substitue parallèlement au système séminal (Grignac ,1965 ; Hazmoune, 1994 ; Hamadache ,2001).

En revanche, le système aérien de la plante est composé de plusieurs longues tiges herbacées, cylindriques, grêles, non ramifiées, renflées au niveau des nœuds. Les tiges sont pleines au niveau des nœuds et creuses dans les entre-nœuds. De telles tiges, appelées chaumes, sont, grâce à cette structure, à la fois souples et résistantes. Les feuilles sont à nervures parallèles et formées en deux parties : la partie inférieure et la partie supérieure (Soltner, 1998).

Les fleurs qui constituent l'appareil reproducteur de la plante sont groupées en inflorescences de type épi. Ce dernier est constitué d'un axe appelé le rachis sur lequel sont fixés les épillets (Belaid, 1996). Cette plante est monoïque à fleurs parfaites (Cook *et al.*, 1991). Elle se reproduit par voie sexué et par l'autofécondation (espèce autogame) (Soltner, 1999). À maturité, le grain de blé est un caryopse ou fruit sec indéhiscent dont les parois sont soudées à celles de la graine (Belaid, 1996 ; Soltner, 2005).

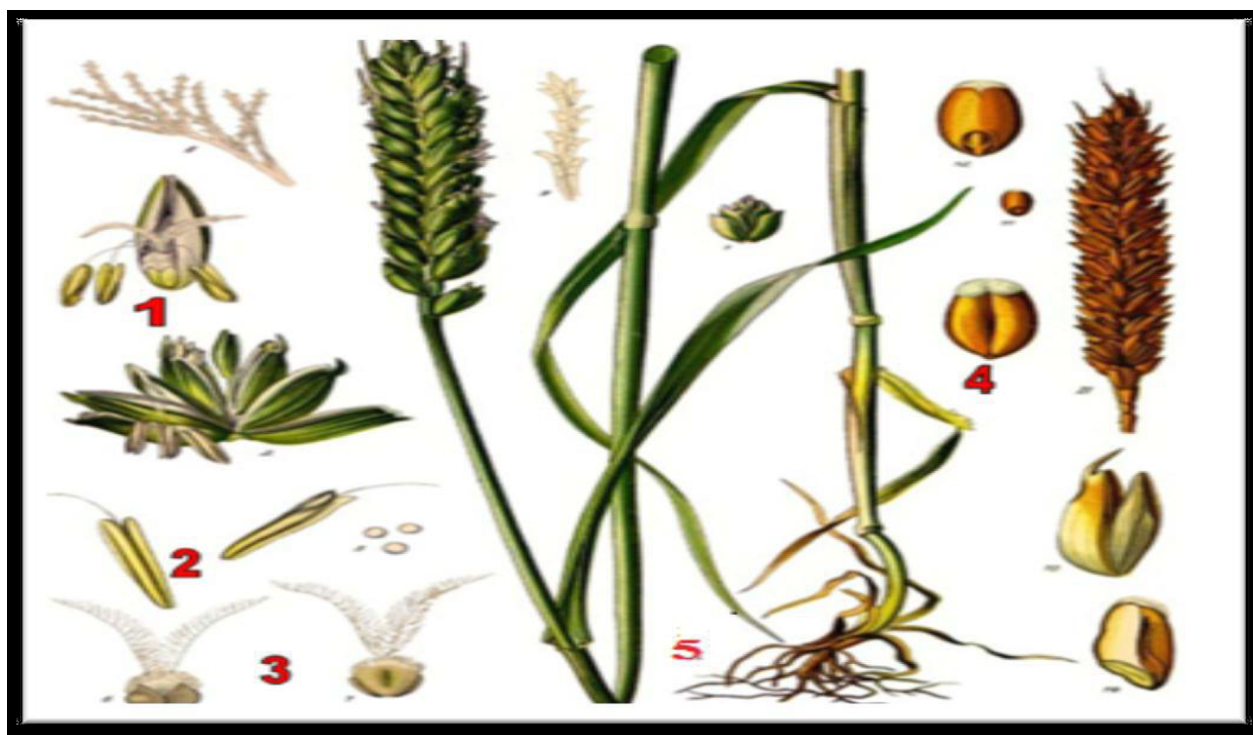


Figure 03. Morphologie d'un plant de blé .1-Fleur de blé ; 2-Etamine ; 3-Pistils
4-grain de blé ; 5- Racines du blé. (Anonyme 2005).

I.1.5. Cycle de développement

Le cycle de croissance de blé se compose de plusieurs phases végétatives au cours desquelles la plante passe d'un stage végétatif à un autre où développent de nouveaux organes (Figure 04). La phase germination – levée correspond à la mise en place du nombre de plantes installées par unité de surface du sol semée. Le stade végétatif de la levée est noté lorsque 50 % des plantes émergent de terre (Henry *et al.*, 2000). Le début de la phase tallage se fait à partir de l'apparition de la 4^{ème} feuille. Il est marqué par l'apparition de l'extrémité de la première feuille de la talle latérale primaire, puis d'autres talles naissent successivement à l'aisselle des 2^{ème} et 3^{ème} feuille de la tige principale ou le maître brin.

La phase du tallage herbacée est suivie par le stade montaison qui débute dès que l'épi du maître brin atteint une longueur de 1 cm, mesurée à partir de la base de la couronne ou plateau de tallage. C'est le stade épi-1cm qui fait suite à l'élongation du premier entre nœuds. La montaison est des phases les plus critiques du développement du blé. Les stress hydriques ou thermiques au cours de cette phase affectent le nombre d'épis montants par unité de surface (Fisher *et al.*, 1998). La phase de montaison se termine une fois l'épi prend sa forme définitive à l'intérieur de la gaine de la feuille étendard qui gonfle, ce qui correspond au stage gonflement.

Le stade épiaison débute par l'apparition de l'épi, hors de la gaine de la feuille drapeau. Les épis dégainés fleurissent généralement entre 4 à 8 jours après l'épiaison (Bahlouli *et al.*, 2005). Selon Abbassenne *et al.*, (1998), les basses températures au cours de cette phase réduisent fortement la fertilité des épis. Après la floraison, débute la phase de remplissage du grain au cours de laquelle le feuillage débute sa sénescence. L'azote et les sucres des feuilles, qui sénescent, sont remobilisés vers le grain (Barbottin *et al.*, 2005). L'évolution du poids du grain se fait en trois étapes : la première est une phase de multiplication des cellules du jeune grain encore vert, dont la teneur en eau est élevée. Cette phase est suivie par la phase de remplissage actif du grain avec les assimilats provenant de la photosynthèse de la feuille étendard et du transfert des hydrates de carbone stockés dans le col de l'épi (Belkherchouch *et al.*, 2009). Les fortes températures au cours de cette période provoquent l'arrêt de la migration des réserves des feuilles et de la tige vers le grain (Bahlouli *et al.*, 2005). Cette phase se termine une fois le contenu du grain atteint son maximum, le grain se dessèche progressivement, pour murir.

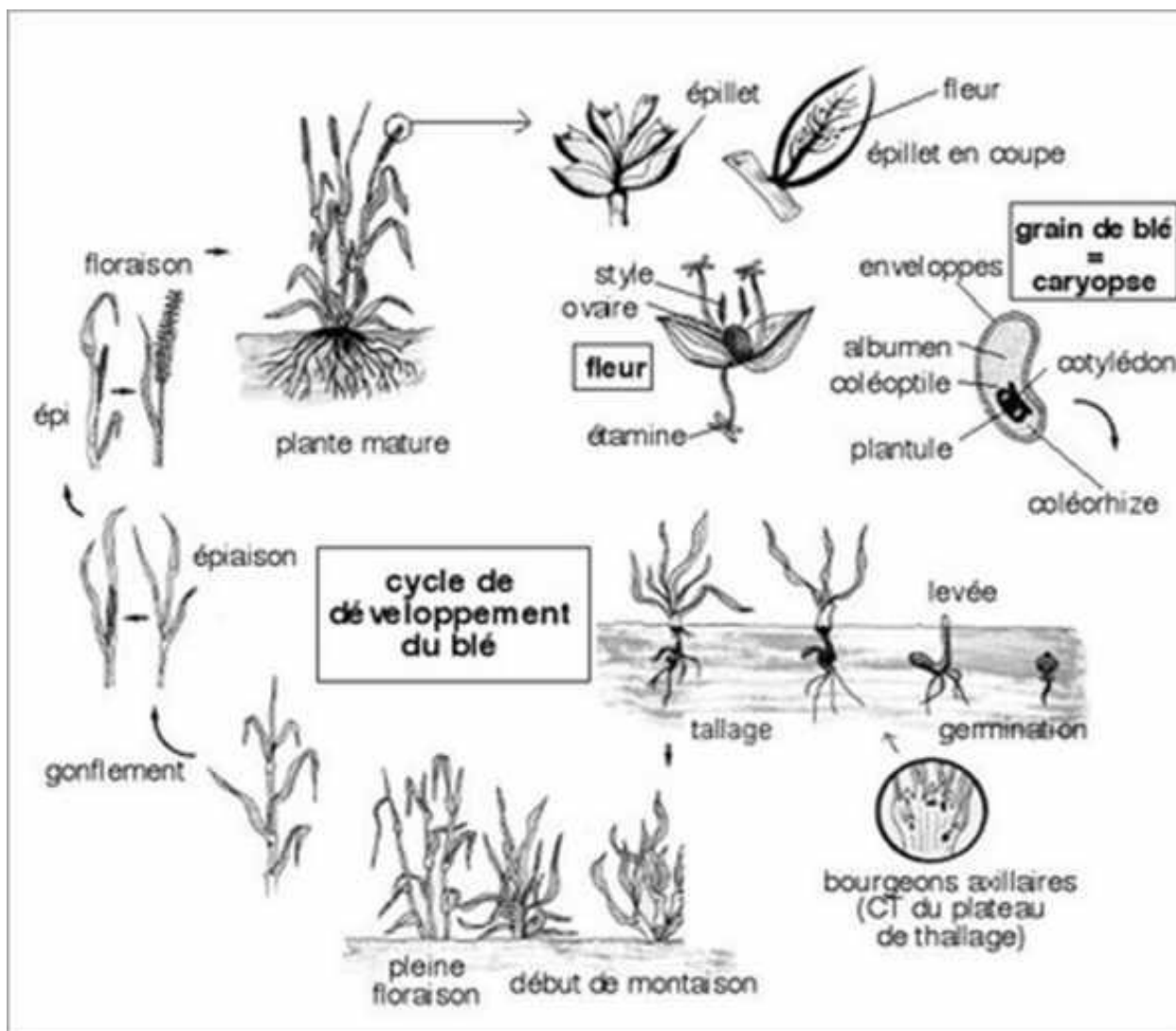


Figure 04. Schéma représentant le cycle de vie du blé dur (Trail, 2010).

I.1.6. Contraintes phytosanitaires

Une maladie de plantes peut être définie par une succession de réponses invisibles et/ou visibles à un microorganisme phytopathogène ou à la modification d'un facteur environnemental (température, pH, humidité et disponibilité d'oxygène), qui provoquent des bouleversements de forme, de fonction ou de l'intégrité de la plante. Il existe, de ce fait, deux types de maladies de plantes, à savoir : des maladies non infectieuses (abiotiques) ; et des maladies infectieuses (biotiques) causées par des champignons, des bactéries, des plantes supérieures parasites, des virus et viroïdes, des nématodes et des protozoaires (Sarah *et al*, 2008).

Dans ce cadre, le blé peut être attaqué par de nombreuses maladies à différents stades de son développement, ces attaques peuvent occasionner des pertes importantes lorsque les variétés

utilisées sont sensibles et les conditions de l'environnement sont favorables à l'expansion des maladies (Ezzahiri, 2001). Les deux principales causes de maladies du blé sont les champignons (*Fusarium culmorum*, *F.graminearum* et *Bipolaris sorokiniana*) et les virus (*Polymyxagraminis*), il peut également être touché par certaines bactérioses (*Pseudomonas syringae* pv. *Atrofaciens*) (Ruel, 2006). Les champignons parasites sont responsables de mycoses dénommées de façon trop générale « maladies cryptogamiques ».

De nombreuses espèces de *Fusarium* sont associées à ces maladies chez la plupart des céréales cultivées actuellement (Devaux, 1995). Les deux maladies les plus communes provoquées par les *Fusaria* sur les céréales à paille sont la gale de l'épi (fusariose de l'épi) et la pourriture racinaire (Zillinsky, 1983).

I.2.Maladies : pourriture racinaire

I.2.1. Agent pathogène « *Fusarium culmorum* »

Le *Fusarium culmorum* est parmi les champignons phytopathogènes les plus importants (Parry *et al.*, 1995; Walter *et al.*, 2010). Ce champignon tellurique, très ubiquitaire, et connu pour sa grande capacité saprophytique, est responsable de plusieurs maladies (fusarioses) dévastatrices. Ces fusarioses ont été reconnues comme les maladies les plus destructrices puisqu'elles touchent une large gamme d'hôtes dont la majorité sont des céréales (Parry *et al.*, 1995; Wagacha et Muthomi, 2007). Ces maladies peuvent survenir à tous les stades de développement de la plante, du semis à la récolte et des racines aux épis. Nous distinguons ainsi la fonte des semis et le dépérissement des jeunes plantules (damping-off et seedlingblight), la brûlure de l'épi (headblight ou scab) et la pourriture des racines (root rot) (Nicholson *et al.*, 2004; Fernandez et Jefferson, 2004). Ces préjudices peuvent causer dans certains cas jusqu'à 50% de pertes de rendement (McMullen *et al.*, 1997; Dill-Macky et Jones, 2000). Les fusarioses des céréales provoquées par ce champignon au Maroc ont entraînés plus de 20% de pertes de rendement sur les cultures d'orge et 8,5% sur les cultures de blé. En Algérie, la maladie est aussi répandue mais les dégâts n'ont pas été encore évalués (Sayoud *et al.*, 1999; Yekkour *et al.*, 2012).

I.2.2. Caractères morphologiques

Le genre *Fusarium* tire son nom du latin « *Fusus* » en référence à ses spores qui sont en forme de fuseau. *F. culmorum* produit de courtes macroconidies qui prennent naissance à partir des sporodochies. Les macroconidies sont à parois épaisses et à surface ventrale et dorsale faiblement arquées, munies généralement de 3 à 5 cloisons (Figure 05). Les chlamydospores se forment

généralement de manière abondante et rapide, soit de façon isolée, soit en chaînes ou en touffes. Sur milieu PDA, la croissance est rapide, avec un mycélium aérien dense. Le mycélium est blanc ou jaune brunâtre. Lorsque la culture devient âgée (7 à 10 jours de culture), des sporodochies de couleur orange à rouge brunâtre apparaissent donnant ainsi une couleur rouge carmin visible au revers de la boîte de Pétri. La forme téléomorphe (sexuée) de ce champignon n'est pas connue (Champion, 1997).

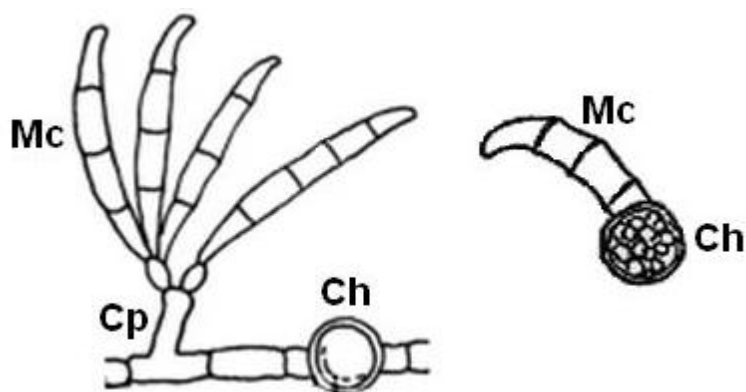


Figure 05. Schéma représentatif de la morphologie de *Fusarium culmorum*. Ch, chlamydospore; Cp, conidiophore, Mc, macroconidie. (Champion, 1997).

I.2.3. Position systématique

C'est un champignon qui appartient à la famille des Tuberculariaceae, à l'ordre des Moniliales et à la classe des Hyphomycètes. Les espèces appartenant à ce genre et possédant une forme sexuée se rapportent généralement aux Hypocréales (Ascomycota). Cependant, certains représentants, tels que *Fusarium culmorum*, ne possèdent pas de phase téléomorphe et se rapportent aux " *fungi imperfecti* " ou Deutéromycètes. Le genre *Fusarium* regroupe plus de 20 espèces (De Hoog et al., 2000).

Fusarium culmorum appartient à la section « *discolor* » (Leslie et Summerell, 2006). Les membres de cette section sont souvent désignés sous le nom de « *Fusarium* des céréales » en référence à leur présence fréquente et aux maladies qu'ils peuvent engendrer sur ce type de culture (Cavelier et al., 1992).

I.2.4. Cycle biologique

Les spores asexuées (conidies) sont la principale source de l'inoculum chez *Fusarium culmorum* (Schluter et al, 2006). Les conidies sont dispersées soit par le vent, soit par les éclaboussures de pluie vers les épis (Jenkinson et Parry, 1994; Fernando et al., 1997).

L'infection des épis de blé a principalement lieu au cours d'une courte période de grande sensibilité lors de l'anthèse (floraison mâle) (Bai et Shaner, 1996). Elle a lieu durant la floraison. Après germination, le tube germinal pénètre dans l'épillet et se développe sur les glumes, utilisant les nutriments disponibles. Le champignon pénètre ensuite dans la fleur et s'enfile dans les stomates, les blessures et les étamines (Mascher *et al.*, 2005). Ces dernières sont le site préféré de pénétration parce qu'elles contiennent des composés qui stimulent la croissance des champignons (Strange et Smith 2012). Le mode d'infection peut toutefois varier d'une variété à l'autre. Quand l'épillet est infecté, le champignon se propage dans le reste de l'épi, soit à l'extérieur, soit à l'intérieur, en utilisant le système vasculaire. Ce dernier type de propagation peut provoquer l'interruption du flux de la sève vers les parties supérieures de l'épi.

I.2.5. Symptomatologie

Les symptômes les plus apparents des pourritures racinaires sont : la fonte des semis, le dépérissement des jeunes plantules, la brûlure de l'épi et la pourriture des racines (headblight ou scab) (Fernandez et Jefferson, 2004).

Les symptômes racinaires sous forme de plages brunes en pourriture humide (Caron, 1993). Sur les feuilles se traduisent par des taches brunâtres ovales qui se dessèchent au bord. Lorsque l'attaque est sévère, les taches se rejoignent et induisent une déchirure de la feuille dans le sens longitudinal. Sur les plantes adultes, on observe une brûlure totale ou partielle des épis (Carver, 2009). Au niveau du grain lui-même, et selon la précocité de l'attaque, on peut être en présence d'une brûlure variable (Figure 06) (Dammer *et al.*, 2011).

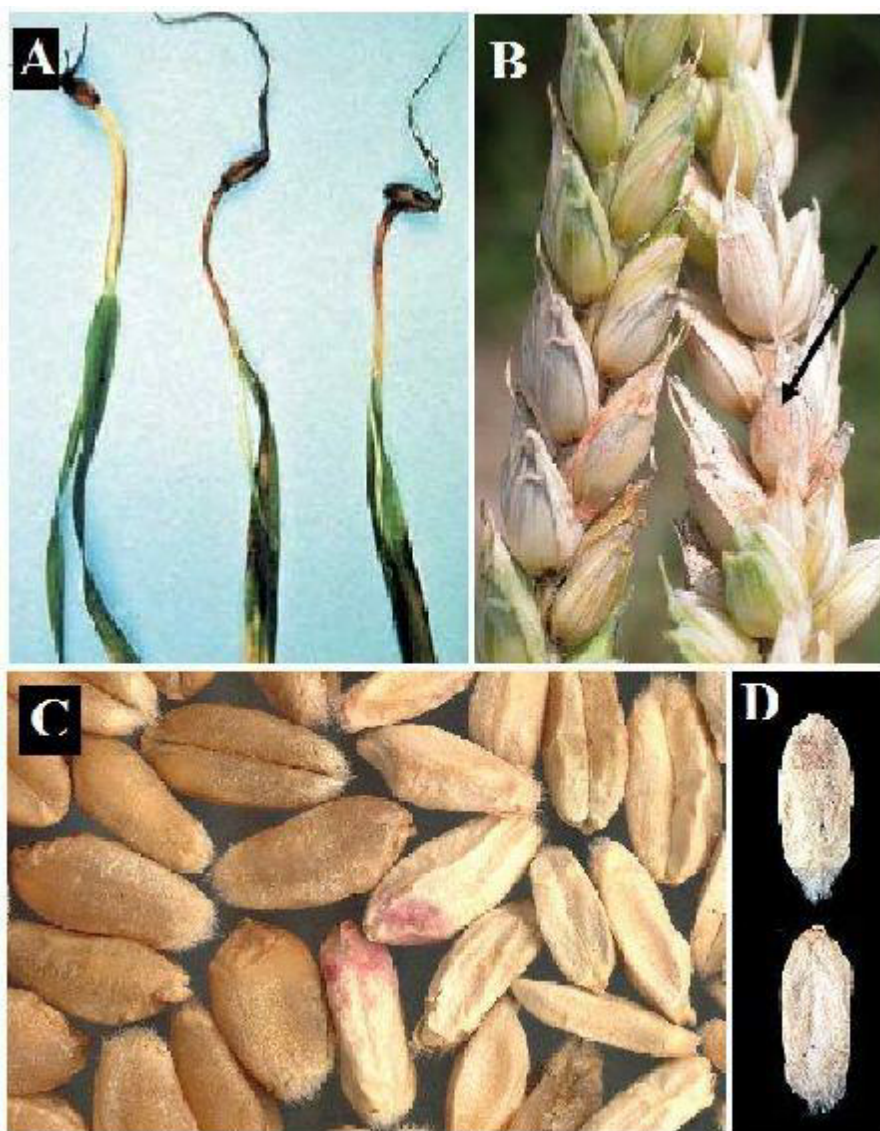


Figure 06. Symptômes de la fusariose observés chez le blé dur (Agrios, 2005).

I.2.6. Moyens de lutte

I.2.6.1. Lutte culturale

Les défauts rencontrés avec les précédentes méthodes a conduit aux pratiques culturales de gestion des fusarioses. Ces alternatives incluent la rotation des cultures, l'utilisation appropriée des engrais, l'irrigation, le désherbage, la préparation préalable du sol avant une culture et la moisson précoce (Wagacha et Muthomie, 2007).

Les *Fusarium* spp. qui infectent les céréales ont la capacité de survivre en saprophyte sur les débris végétaux (Parry *et al.*, 1995; Jones, 2000). Ainsi, les labours permettent d'enfouir les résidus de culture et suppriment la source d'inoculum disponible.

Une rotation mettant en œuvre une légumineuse entre une culture de maïs et une autre céréale laisse le temps à la population pathogène de décliner lors de la dégradation naturelle des résidus (Champeil *et al.*, 2004).

I.2.6.2. Lutte génétique

L'utilisation des variétés de blé résistantes aux *Fusarium* spp. peut être la méthode de lutte la plus écologique, la plus économique et la plus efficace.

Chez le blé, deux types de résistance ont été rapportés: la résistance à l'infection primaire et la résistance à la propagation de la maladie au sein de l'épi (Schroeder et Christensen, 1963). Kang et Buchenauer (2000) ont signalé que les cultivars résistants aux brûlures ont développé des réactions de défense active pendant l'infection et la propagation de *F. culmorum* dans les tissus de la plante hôte.

I.2.6.3. Lutte chimique

La lutte chimique utilise des pesticides (fongicides), prescrits par leurs fabricants comme les triazoles utilisés au moment de la floraison, limitent la fusariose sur l'épi des céréales et donc l'accumulation de toxines dans la plante.

Encore, pour l'ensemble des fongicides, une application homogénéisée, dans le temps approprié est indispensable pour la réussite de traitement (Yuen, 2007).

Parmi les fongicides chimiques utilisés en Algérie pour lutter contre *Fusarium culmorum*, le Dividend 030FS (Difénoconazole) qui est le plus répandu comme traitement de semence, Vitaflo 280 (Carbathiine, Thitame) et Raxil PRO MD (Tébuconazole, métalaxylprothioconazole) (Index phytosanitaires, 2015).

I.2.6.4. Lutte biologique

La lutte biologique est définie comme « l'utilisation d'organismes vivants, ou des produits de leurs gènes, pour limiter ou supprimer les activités et les populations de pathogènes » (Fravel, 2005 ; Paulitz et Bélanger, 2001).

L'application des agents de lutte biologique sur les cultures présente plusieurs avantages, les plus importants sont l'absence d'effets secondaires nocifs (absence de résidus chimiques, de pollution chimique) et de danger pour l'environnement ou sur les cultures, car les biopesticides sont spécifiques à l'espèce-cible (Meyer, 2002).

De plus, les biopesticides sont souvent efficaces en faible quantité et leurs activités protectrices peuvent relever de mécanismes multiples déclenchant rarement ainsi des phénomènes de résistance chez le pathogène grâce à une faible pression de sélection (Fravel, 2005 ; Thakore, 2006).

Plusieurs microorganismes du sol appartiennent aux genres *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Agrobacterium* et *Streptomyces* ont été utilisés pour lutter contre les agents phytopathogènes. Ces microorganismes jouent un rôle important dans la protection de la plante (Benizri *et al.*, 2001), au titre d'exemples, les actinobactéries utilisés comme antagonistes naturels de plusieurs champignons phytopathogènes tels le cas de *Fusarium culmorum* (Rakotoarimanga *et al.*, 2014).

I.3. Actinobactéries

I.3.1. Généralités

Morphologiquement, les actinobactéries peuvent être classés en deux groupes. Le premier se compose d'organismes qui ne présentent pas de caractéristiques morphologiques particulières et forme seulement une masse de filaments ramifié. Le second comprend les organismes qui sont morphologiquement plus complexes que le premier (Lechevalier et Lechevalier, 1985). Les colonies formées par les actinobactéries sur des milieux solides présentent différents aspects macroscopiques qui peuvent être regroupés en trois types :

- Des colonies poudreuses couvertes d'hyphes aériens fermement attachés au milieu ;
- Des colonies pâteuses qui peuvent être facilement détachées des milieux solides ;
- Des colonies exemptes de mycélium de substrat et se composent d'hyphes aériens attachés au milieu par des crampons.

Les différents genres actinobactéries peuvent sporuler soit en morcelant certaines hyphes pour former des conidies, un peu plus résistantes aux conditions hostiles que les hyphes, soit en produisant des endospores (*Thermoactinomyces*). D'autres genres actinobactéries sporulent en produisant des sporanges tels que le genre *Streptosporangium* (Kalakoutskii et Agre, 1976).

Les spores peuvent, selon les genres, être produites isolément (*Micromonospora*), deux à deux longitudinalement (*Microbispora*), en courtes chaînes (*Actinomadura*), en longues chaînettes (*Streptomyces*). Les chaînettes de spores peuvent être ramifiées ou non, droites, flexibles ou en spirales (Figure 07). De plus, elles peuvent être rayonnantes autour d'hyphes sporophores. La majorité des actinobactéries cultivés sur milieu solide forment un mycélium de substrat et un mycélium aérien. Néanmoins, il existe des groupes qui ne forment qu'un mycélium de substrat

poussant à la surface et dans le milieu de culture ou un mycélium aérien dont les hyphes sont attachés au milieu par des crampons (Holdfasts, 2002).

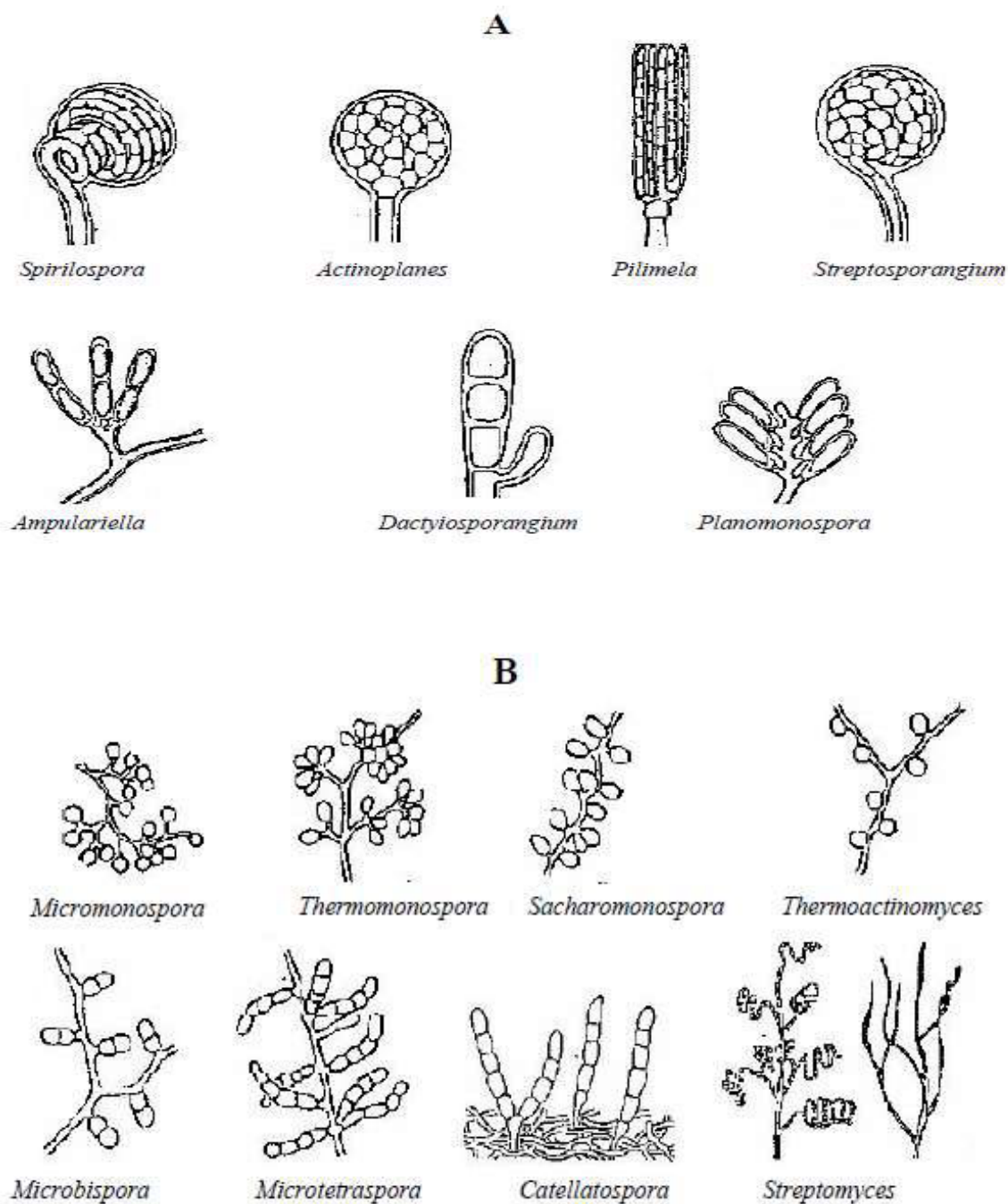


Figure 07. Différentes chaînes de spores chez les actinobactéries (Breton *et al*, 1989).

I.3.2. Taxonomie

Les actinobactéries appartiennent au règne des procaryotes, à la division des Firmicute. Selon Lechevalier et Lechevalier (1965), la position taxonomique des actinobactéries (en prenant comme exemple *Streptomyces griseus*) s'établit comme suit :

Classe : Actinobacteria

Ordre : Actinomycetales

Sous-Ordre : Streptomycineae

Famille : Streptomycetaceae

Genre : *Streptomyces*

Espèce : *Streptomyces griseus*

La classification hiérarchique des actinobactéries ne change pas les descriptions courantes des espèces et des genres. En effet, leur classification, basée sur des caractéristiques morphologiques, chimio-taxonomiques ou physiologiques, a été vérifiée pendant ces 20 dernières années, et il s'est avéré qu'elle est en accord avec le regroupement phylogénétique basé sur l'ADN /ARNr 16S (Stackebrandt, 2010).

I.3.3. Cycle biologique

Les actinobactéries possèdent une structure de procaryotes, mais un cycle biologique semblable à certains champignons (Floyd *et al.*, 1987; Sanglier et Trujillo, 1997). Le cycle de développement des *Streptomyces* débute par la germination des spores, il comprend quatre étapes : l'activation, l'initiation, l'émergence du tube germinatif et enfin la croissance. Parfois, l'activation peut être déclenchée par un choc thermique, par exemple un traitement de 5 minutes à 50°C pour les spores de *Streptomyces viridochromogenes*, puis le tube de germination croît et donne des hyphes non séptés et plurinuclées, ramifiés et ancrés dans le milieu solide appelés le mycélium primaire, de substrat ou végétatif. Sur ce mycélium primaire, se développera, ensuite, un mycélium aérien ou secondaire composé d'hyphes dressés sur le mycélium de substrat, leurs extrémités se cloisonnent et se différencient pour former des chaînes de spores uninuclées (Figure 08) (Hopwood *et al.*, 1985).

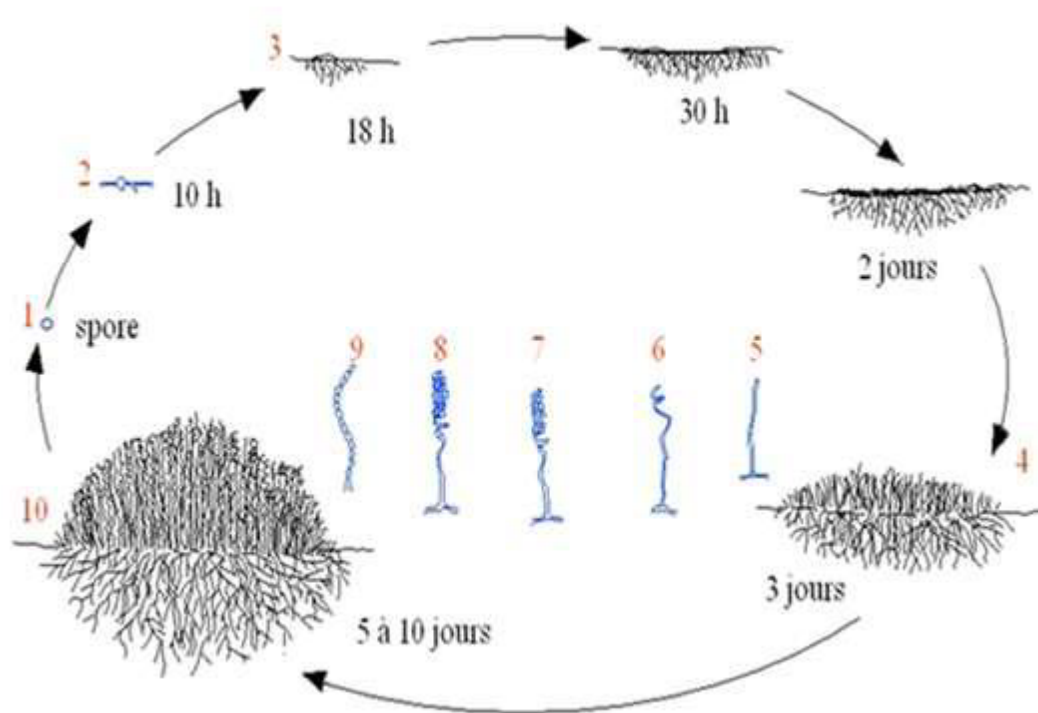


Figure 08. Cycle de développement des *Streptomyces* sur milieu solide (Hopwood *et al.*, 1985).

I.3.4. Importance

I.3.4.1. En biotechnologie

Les actinobactéries constituent une source importante d'antibiotiques et d'autres métabolites secondaires à utilité industrielle (Takahashi et Omura, 2003; Hayakawa *et al.*, 2004). Plus de 70% des antibiotiques d'origine microbienne sont produits par ce vaste groupe bactérien (Gundliffe, 2006). Les actinobactéries produisent un grand nombre d'antibiotiques de structures chimiques très variées (aminoglycosides, anthracyclines, glycopeptides, beta-lactamines, macrolides, etc...) qui ont de nombreuses applications thérapeutiques (Okami et Hotta, 1988).

Le genre *Streptomyces* a été largement exploré pour la sélection des agents de biocontrôle (El-Tarabily et Sivasithamparam, 2006) et 75% des antibiotiques sont produits par les membres de ce genre.

I.3.4.2. Dans le domaine agronomique

Les actinobactéries ont un rôle important dans l'amélioration de la qualité du sol agricole. En effet, ils contribuent à la fertilisation du sol. Ils contribuent aux processus du recyclage et de la

biodégradation de la matière organique et des éléments minéraux (Goodfellow *et al.*, 1984). Les actinobactéries ont un grand pouvoir de transformation des substances organiques complexes difficilement dégradables ou non, par les autres microorganismes, comme les polymères complexes: les polysaccharides, les lignocelluloses, la chitine (Goodfellow et Williams, 1983).

Le genre *Frankia* s'intègre aux racines avec plus de 200 espèces des angiospermes, fixe l'azote et joue un rôle dans la protection des plantes contre les pathogènes (Sardi *et al.*, 1992; Thirupl *et al.*, 2001; Pawlowski et Sirrenberg, 2003).

Ces bactéries contribuent également au maintien d'une bonne structure du sol. En effet, leur structure filamenteuse ainsi que la production des polysaccharides permettent le maintien entre les particules du sol (Kennedy, 1999). Ils améliorent aussi l'infiltration de l'eau dans le sol et permettent ainsi une bonne aération du sol (Mckenna *et al.*, 2002).

Outre la structure et la fertilité du sol, les actinobactéries augmentent le pouvoir suppressif du sol. Mazzola (2002), a montré qu'un sol riche en actinobactéries est suppressif aux maladies phytopathogènes qu'un sol pauvre de ces bactéries (Errakhi, 2008).

I.3.5. Ecologie

Ecologiquement, il existe deux groupes d'actinobactéries. En premier lieu, les formes fermentatives, anaérobies strictes ou facultatives, illustrées par le genre *Actinomyces*. Ces organismes sont des saprophytes obligés des cavités naturelles de l'homme et des animaux supérieurs et ils ne sont jamais retrouvés dans le sol (Mariat et Sebald, 1990). En second lieu, les formes oxydatives, aérobies, tels que les *Streptomyces* où le sol est leur réservoir principal et à partir duquel elles sont disséminées, en particulier dans l'air (Reponen *et al.*, 1998). Les *Streptomyces* disséminés dans les eaux douces et salées, s'adaptent en formant des spores résistantes caractérisées soit par une psychrophilie, soit par une halophilie ou par une barotolérance (Mincer *et al.*, 2002; Zaitlin *et al.*, 2003). Certains genres d'actinobactéries ont été isolés à partir des composts (Lacey, 1997; Song *et al.*, 2001). Quelques espèces d'actinobactéries sont des symbiotes de plantes (Larpen et Larpen-Gourgau, 1985). Le genre *Frankia* s'intègre aux racines, fixe l'azote et joue un rôle dans la protection des plantes contre les pathogènes (Sardi *et al.*, 1992; Thirupl *et al.*, 2001).

En général, les actinobactéries sont des chimioorganotrophes utilisant une grande variété de sources d'énergie y compris les polymères complexes. Mais plusieurs espèces sont capables aussi

de croissance chimioautotrophique utilisant l'oxydation de l'hydrogène comme source d'énergie et le gaz carbonique comme source de carbone (Mariat et Sebald, 1990).

I.3.6. Interaction actinobactéries-plante

En lutte biologique l'efficacité d'une souche donnée est basée sur son potentiel à coloniser efficacement le système racinaire et la couche environnante du sol (rhizosphère). Cela signifie qu'elle doit être dominante par rapport aux autres populations microbiennes et qu'elle persiste sous les faibles ressources nutritionnelles disponibles dans le micro environnement (Van Den Broek *et al.*, 2003 ; Bloemberg *et al.*, 2001).

En effet, les actinobactéries sont des bactéries saprophytes capables de dégrader la matière organique dans le sol et d'utiliser des molécules plus complexes pour leur croissance (Lechevalier et Lechevalier, 1970). Ceci leur permet de s'adapter et de coloniser différents milieux rhizosphériques. Cette caractéristique est essentielle dans la lutte biologique. Ainsi, les actinobactéries peuvent agir par différents mécanismes d'antagonisme, comme l'antibiose, la compétition nutritionnelle ou spatiale ou encore le parasitisme (Errakhi, 2008). Ils ont la capacité de parasiter des champignons en produisant des enzymes qui leur permettent de dégrader la paroi des cellules fongiques (Mahadevan et Crawford, 1997).

Le parasitisme des mycéliums de champignons par les actinobactéries a été décrit dans plusieurs travaux (El-Tarabily et Sivasithampar, 2006 ; Errakhi *et al.*, 2007 ; Jain et Jain, 2007).

En revanche, certaines espèces des actinobactéries sont symbiotiques des plantes supérieures. Ces bactéries endophytes forment des associations appelées actinorhizes permettant la fixation d'azote. Le genre *Frankia* établit une association symbiotique avec plusieurs phanérogames. L'exemple le plus connu est l'aulne (*Alnus*) où ces actinobactéries forment au niveau des racines, des nodules où l'azote gazeux est fixé grâce à une nitrogénase (Baker, 1988).

I.3.7. Utilisation des actinobactéries en lutte biologique

I.3.7.1. Mécanismes impliqués dans le biocontrôle

I.3.7.1.1. Activité antagoniste

L'activité antagoniste de *Streptomyces* vis-à-vis des pathogènes fongiques est généralement liée à la production de composés antifongiques extracellulaires et des enzymes hydrolytiques (Prapagdee *et al.*, 2008). D'autres genres appartenant aux actinobactéries sont également des producteurs de molécules possédant des activités antifongiques (Trujillo, 1997).

I.3.7.1.2. Production des enzymes lytiques

Les actinobactéries synthétisent des chitinases, des glucanases, des peroxydases (Tokala *et al.*, 2002) et des glutaminases (DivyaTeja *et al.*, 2014). Des espèces de *Streptomyces* produisent des amylases, des cellulases et des hémi-cellulases. D'autres sont capables de dégrader la lignine. *Streptosporangium* sp. isolé à partir des feuilles de maïs produit des glucoamylases exploitées en industrie afin de dégrader l'amidon (Hasegawa *et al.*, 2006). Les lipases sont aussi produites par certaines souches actinomycétales, ces enzymes catalysent l'hydrolyse des triglycérides en diglycérides, en monoglycérides, en glycérol et en acides gras (Sommer *et al.*, 1997). La production d'enzymes chénotiques (chitinases et cellulases) par *Streptomyces albobovineus*, *S. caviscabies*, *S. griseus*, *S. setonii* et *S. virginiae* est considérée comme l'action antagoniste la plus efficace dans le contrôle de certaines maladies fongiques en raison de leur action directe sur les chitinases (Macagnan *et al.*, 2008). Les protéases sont parmi les enzymes les plus importantes, elles constituent plus de 65% des applications industrielles totales comme agents blanchisseurs dans les détergents ou dans la synthèse des peptides. *Nocardia* sp. NCIM 5142 et *Streptomyces pactum* DSM 40530 sont parmi les actinobactéries les plus exploitées dans la production des peptides (Thumar et Singh, 2007).

I.3.7.1.3. Production des sidérophores

Le fer est considéré comme le micro-élément le plus important utilisé par les bactéries, il joue également le rôle de cofacteur de nombreuses enzymes et protéines (Djibaoui et Bensoltane, 2005). Dans des conditions aérobies à pH neutre ou alcalin, cet élément est retrouvé dans la nature sous des formes insolubles dont elles ne peuvent pas être assimilées par les plantes et les bactéries. Ces dernières ont développé de nombreux systèmes de chélation de fer à partir de l'environnement qui utilisent le plus souvent les sidérophores ayant l'affinité la plus élevée pour le fer. Les sidérophores sont des molécules de faible poids moléculaire secrétées par de nombreux champignons et bactéries en réponse à la carence en fer (Pérez-Miranda *et al.*, 2007). Ils solubilisent et transportent le fer vers la cellule microbienne à travers des récepteurs spécifiques (Cabrera *et al.*, 2001; Sridevi *et al.*, 2008). Les streptomycètes du sol sont capables de produire les sidérophores (Muller *et al.*, 1984). *Streptomyces fulvissimus* ATCC 27431 en accumule à un taux avoisinant 94% (Bendale *et al.*, 2009).

I.3.7.1.4. Production de l'acide cyanhydrique (HCN)

Certains gaz volatiles comme l'HCN (antibiotique), sont connus par leur action négative sur les champignons phytopathogènes. La production de l'HCN est une activité très commune chez les espèces appartient au genre *Streptomyces* (Schippers *et al.*, 1990). Defago *et al.* (1990), suggèrent que la production de l'acide cyanhydrique provoquerait sur la plante un stress auquel elle réagirait par un développement de son système racinaire et de sa résistance naturelle (Lemanceau, 1991).

I.3.7.1.5. Induction de la résistance systémique

Des microorganismes de lutte biologique sont capables de déclencher une résistance systémique induite (ISR) chez la plante hôte, ce qui peut rendre l'hôte plus résistant à l'agression future par des agents pathogènes (Jijakli, 2003). L'induction des systèmes de résistance chez la plante a été démontrée pour la première fois par kempe et Sequira (1983). Ces derniers ont remarqué que des pré-traitements par des bactéries (*Streptomyces griseoviridis* et *S.lydicus*) ont protégé des tubercules de pomme de terre des infections de *Pseudomonas solanacearum*.

Le microorganisme antagoniste peut consister en une souche avirulente occupant la même niche écologique qu'un agent pathogène. L'induction des systèmes de résistance se manifeste par des modifications au niveau de la composition des parois cellulaires ou la libération des éliciteurs. Ces derniers sont des substances qui stimulent les mécanismes de défense de la plante. Celle-ci produira alors des phytoalexines et des protéines PR qui lui confèrent une résistance systémique (Agrios, 1988; Toussaint, 1996).

I.3.7.2. Mécanismes impliqués dans l'effet PGPB

I.3.7.2.1. Solubilisation des phosphates inorganiques

Le phosphore est considéré comme l'un des éléments essentiels limitant la production agricole, sa teneur dans le sol est estimée à 400-1200 mg/Kg (Fernandez et Novo, 1988). Il est présent sous forme de composés métalliques liés au fer, à l'aluminium, ou au silicium dans les sols acides ou avec le carbonate de calcium dans les sols alcalins (Whitelaw, 2000). Afin de compenser cette pauvreté naturelle en phosphore, ce dernier est ajouté au sol sous formes de fertilisants phosphorés dont seulement 1% est utilisé par les plantes, le reste est rapidement converti en composés insolubles tels que les phosphates calcique et ferrique. Pour cette raison, les microorganismes solubilisant les phosphates ont un intérêt particulier (Yadav *et al.*, 2011), les

bactéries et les levures sont les plus performants (Sahu *et al.*, 2007). Parmi les bactéries possédant cette activité, les actinobactéries occupent une place de choix (Jiang *et al.*, 2005). Les mines marocaines, par exemple, sont riches en phosphore et constituent alors de bons sites pour l'isolement de ces bactéries (Hamdali *et al.*, 2008). *Micromonospora aurantica* et *S. griseus* (Hamdali *et al.*, 2008) et *S. lividans* (Hamdali *et al.*, 2010) isolés à partir des mines marocaines solubilisent efficacement le phosphore et améliorent sensiblement le poids frais des tiges et des racines (Hamdali *et al.*, 2008). Certaines actinobactéries possèdent une capacité importante de produire des phosphatases alcalines (Ghorbani-Nasrabadi *et al.*, 2013). *Micromonospora endolithica* par exemple, solubilise des quantités importantes de phosphore et produit des phosphatases alcalines et acides, à ceci s'ajoute sa capacité de coloniser *Phaseolus vulgaris* L. (El-Tarabily *et al.*, 2008).

I.3.7.2.2. Production de l'ammoniaque

Parmi les éléments nutritifs nécessaires, et celui qui est le plus souvent limitant pour la croissance des plantes est l'azote. La majeure partie de cet élément se trouve sous forme d'azote gazeux (N₂) inaccessible aux plantes (Pujie et Normand, 2009). L'azote représente environ 2% de la matière sèche totale de la plante qui entre dans la chaîne alimentaire. Néanmoins, les plantes ne peuvent pas accéder directement au gaz nitreux, qui représente environ 80% de l'ammonium et de nitrates. Plusieurs recherches ont montré que les actinobactéries ont des effets bénéfiques sur les plantes, en procurant à la plante l'azote sous forme d'ammonium par leurs associations avec les légumineuses et certaines graminées (Benmati *et al.*, 2012).

I.3.7.2.3. Production des phytohormones

Les actinobactéries sont capables de produire des phytohormones tel que les auxines et les gibbérellines (Ahmed *et al.*, 2005). Parmi les auxines, l'Acide Indole-3-Acétique (AIA) qui stimule la germination des graines de blé et joue un rôle essentiel dans l'élongation racinaire, la formation des racines latérales et la croissance et le développement des plantes par son effet sur la division cellulaire (Duca *et al.*, 2014). Les gibbérellines synthétisées par des actinobactéries endophytes sont transportées pour contrôler la croissance des organes floraux et des fruits (Kaneko *et al.*, 2003).

Durant ces dernières années, plusieurs espèces d'actinobactéries endophytes, notamment ceux appartenant aux genres *Streptomyces*, *Nocardia*, *Amiclatopsis*, *Micromonospora* et

Microbispora, ont été étudiées pour leur faculté à produire des phytohormones et pour leur rôle dans la promotion de la croissance des plantes cultivées. Parmi ces genres, certaines espèces ont été formulées et commercialisées en tant que biopesticides à effet *PGPB* (Cao *et al.*, 2005; Shi *et al.*, 2009; Ruanpanun *et al.*, 2010).

I.3.8. Formulation des biofongicides à base des spores d'actinobactéries

De nombreux agents de lutte biologique ont été formulés dans divers formes liquides, solides et en poudre mouillables pour contrôler des agents phytopathogènes (Lewis, 1991 ; Lumsden *et al.*, 1995). Parmi les biofongicides formulés à base d'actinobactéries nous pouvons citer l'Actinovate®, l'Actino-Iron® et le Mycostop®.

L'Actinovate®, formulé à base de l'isolat (*Streptomyces lydicus* isolat WYEC 108), est un biofongicide qui permet de réprimer de la pourriture grise et l'oïdium des fraises, aussi la pourriture blanche des cucurbitacées et de la tomate. Ce biofongicide peut diminuer des symptômes de pourriture de fruit, et également remédier le flétrissement fusarien sur les cyclamens, le pourridié pythien sur les pétunias, la pourriture des racines et du collet causé par *Rhizoctonia* sur les géraniums et le blanc sur les verbans, la pourriture racinaire du blé causé par *F. culmorum* (RAP, 2014 ; Toumatia, 2015).

L'Actino-Iron®, est un biofongicide fabriqué à base de l'isolat (*Streptomyces lydicus* isolat WYEC 108) hautement concentré sur un support en fer et en acide humique. Il protège les racines contre l'agent pathogène appartenant au genre : *Pythium*, *Phytophthora*, *Fusarium*, *Rhizoctonia* et autre maladies à racines (Mediak, 1995).

Le Mycostop® WP, un biofongicide appliqué sous forme d'eau ou de pulvérisation, il est fiable pour contrôler la fonte de semis, les maladies racinaires et les flétrissements. En plus, il stimule la croissance et induit les mécanismes de défense des plantes. Il est efficace dans les milieux de culture organique et de synthèse (Verdera, 2014). Ce biofongicide est formulé à base d'isolat (*Streptomyces griseoviridis* isolat K61).

Partie I. Synthèse bibliographique

I.1.Plante hôte : blé dur

I.1.1. Historique

La découverte du blé remonte à 15000 ans avant Jésus-Christ dans la région du croissant fertile, vaste territoire comprenant, la vallée du Jourdain et des zones adjacentes de Palestine, de la Jordanie, de l'Iraq, et la bordure Ouest de l'Iran (Feldman et Sears, 1981 ; Mouellef, 2010). C'était à une époque où l'homme pratiquait déjà la cueillette et faisait ses débuts comme agriculteur. Cette période coïncidait avec un épisode climatique sec, aboutissant à l'arrêt du mode de vie de "chasseur-cueilleur", et engendrant la domestication progressive des plantes, associée à la création des premières communautés villageoises (Wadley et Martin, 1993).

L'espèce de cette époque lointaine, le *Triticum monococcum* L, est un des ancêtres des blés actuels. Le genre *Triticum*, se subdivise, en fonction du niveau de ploïdie, en trois groupes: diploïde, tétraploïde et hexaploïde, avec respectivement 14, 28 et 42 chromosomes (Sakamura, 1918 ; Harlan, 1971). Ces trois groupes sont représentés, respectivement, par *Triticum monococcum* L., *Triticum turgidum* ssp *durum* L. et *Triticum aestivum* L. Le génome de ces espèces est organisé en une série basique de 7 chromosomes (X = 7 chromosomes), qui, au cours de l'évolution, a gardé une certaine homologie, malgré la spéciation chez la famille des *Poaceae* (Ahn *et al.*, 1993).

Le croisement spontané du *Triticum monococum* sauvage et *Aegylops speltoides*, a permis l'apparition du blé dur *Triticum diccoides* qui en suit progressivement évalués vers *Tritucum turgidum*ssp *dicocum* puis vers *Triticum durum* ou blé dur cultivé (Rosalind et Sears, 1967).

I.1.2. Classification botanique

Le blé dur est une plante annuelle, monocotylédone, appartenant à la famille des *Poaceae*. La classification du blé dur, selon Brouillet *et al.*, (2006) est la suivante :

Embranchement	Spermaphytes
S/Embranchement	Angiospermes
Classe	Monocotylédones
Super Ordre	Commeliniflorales
Ordre	Poales
Famille	Poaceae
Genre	<i>Triticum</i>

Espèce *Triticum durum* Desf

I.1.3. Importance économique

I.1.3.1. Dans le monde

Le blé dur (*T. durum*) occupe, à l'échelle mondiale, une place primordiale dans le système agricole. Il est considéré comme une principale source de l'alimentation humaine et animale (Slama *et al.*, 2005). Il assure 15% des besoins énergétiques (Bonjean et Picard, 1990), et il est considéré aussi comme une très grande ressource de protéines et d'hydrate de carbones (Monneveux, 2002). En outre, ses sous-produits (paille) servent d'aliments pour le bétail. Le blé est cultivé principalement dans les pays du bassin méditerranéen à climat arides et semi-arides. Ces régions se caractérisent par l'augmentation de la température couplée à la baisse des précipitations, en plus de la désertification et la sécheresse (Nadjemkamel, 2012).

Cependant, on peut constater que les principaux pays exportateurs du blé dur sont : le Canada, les Etats-Unis, l'Union Européen (80 % des parts de marchés) et le Mexique. Par ailleurs, les principaux pays importateurs sont : l'Algérie, l'Italie et le Maroc (pays méditerranéens : 2/3 des échanges mondiaux) (Crystel, 2014) (Figure 01). Leurs importations augmentent régulièrement, en relation avec une production déficitaire et parfois irrégulière, et une population en hausse (Renaud, 2014).

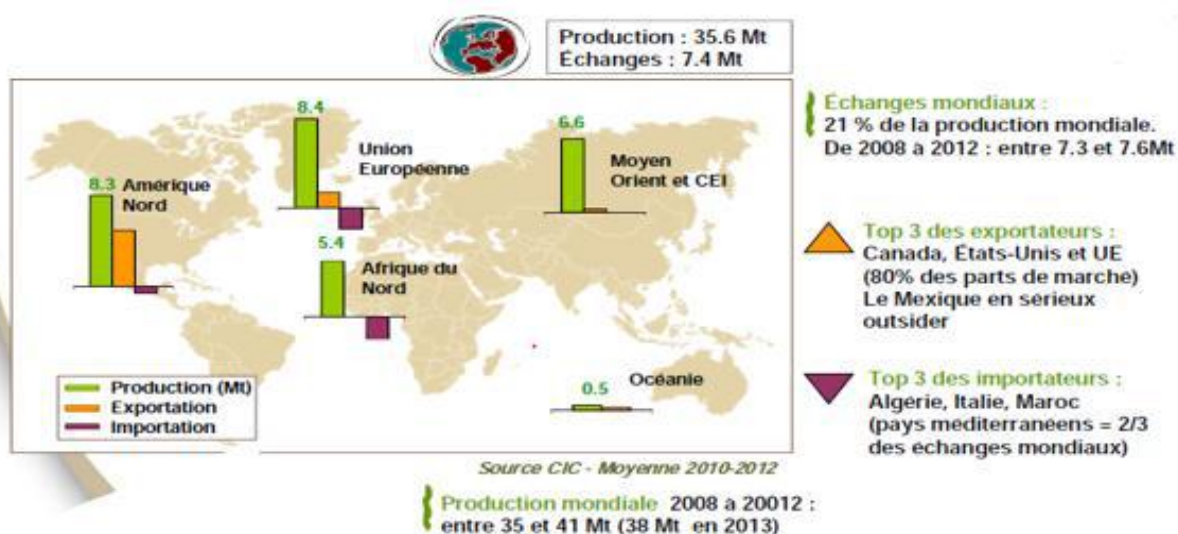


Figure 01. Marché mondial de blé dur (Crystel, 2014).

I.1.3.2. En Algérie

En Algérie la céréaliculture constitue la principale activité agricole, notamment dans les zones arides et semi-arides. Les terres annuellement emblavées représentent 3,6 millions d'hectares. La superficie occupée par le blé dur est en moyenne de 1,3 millions d'hectares, durant la période 2000-2010 (MADR, 2011). L'importance des superficies occupées par cette espèce, comparativement à la superficie occupée par l'orge, est influencée par le prix à la production garanti par l'Etat. Ces prix sont de 4500, 3500 et 2500 DA respectivement pour le blé dur, le blé tendre et l'orge (Figure 2).

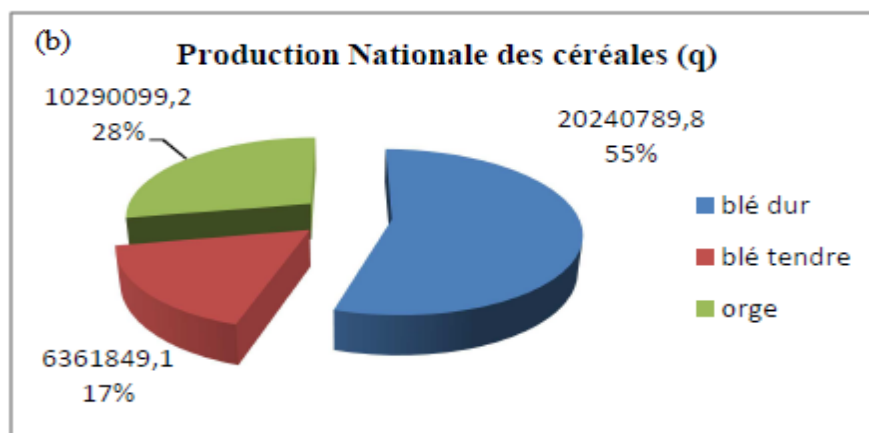


Figure 02. Production algérienne des céréales lors de la campagne 2013/2014.

I.1.4. Caractéristiques morphologiques

Il s'agit d'une graminée annuelle de hauteur moyenne (Bozzini, 1988), dont l'appareil végétatif comporte un appareil racinaire et un appareil aérien (Figure 03).

Le système racinaire est de type fasciculé qui résulte de la succession de deux systèmes au cours du développement de la plante :

- Système primaire (racines séminales) : ce système de racines fonctionne de la germination à la ramification de la plante c'est-à-dire au tallage. Ces racines sont d'origines embryonnaires cependant associés dans le grain aux différentes parties de l'embryon qui selon (Grignac, 1965) sont :

- Une racine principale résultant de l'allongement de la radicule.
- Deux paires de racines latérales.
- Une racine épiblastique.

- Système secondaire (racines adventives) : c'est un système de racines coronaires ou système de racines de tallage. Il se forme dès le tallage et se substitue parallèlement au système séminal (Grignac ,1965 ; Hazmoune, 1994 ; Hamadache ,2001).

En revanche, le système aérien de la plante est composé de plusieurs longues tiges herbacées, cylindriques, grêles, non ramifiées, renflées au niveau des nœuds. Les tiges sont pleines au niveau des nœuds et creuses dans les entre-nœuds. De telles tiges, appelées chaumes, sont, grâce à cette structure, à la fois souples et résistantes. Les feuilles sont à nervures parallèles et formées en deux parties : la partie inférieure et la partie supérieure (Soltner, 1998).

Les fleurs qui constituent l'appareil reproducteur de la plante sont groupées en inflorescences de type épi. Ce dernier est constitué d'un axe appelé le rachis sur lequel sont fixés les épillets (Belaid, 1996). Cette plante est monoïque à fleurs parfaites (Cook *et al.*, 1991). Elle se reproduit par voie sexué et par l'autofécondation (espèce autogame) (Soltner, 1999). À maturité, le grain de blé est un caryopse ou fruit sec indéhiscent dont les parois sont soudées à celles de la graine (Belaid, 1996 ; Soltner, 2005).



Figure 03. Morphologie d'un plant de blé .1-Fleur de blé ; 2-Etamine ; 3-Pistils
4-grain de blé ; 5- Racines du blé. (Anonyme 2005).

I.1.5. Cycle de développement

Le cycle de croissance de blé se compose de plusieurs phases végétatives au cours desquelles la plante passe d'un stage végétatif à un autre où développent de nouveaux organes (Figure 04). La phase germination – levée correspond à la mise en place du nombre de plantes installées par unité de surface du sol semée. Le stade végétatif de la levée est noté lorsque 50 % des plantes émergent de terre (Henry *et al.*, 2000). Le début de la phase tallage se fait à partir de l'apparition de la 4^{ème} feuille. Il est marqué par l'apparition de l'extrémité de la première feuille de la talle latérale primaire, puis d'autres talles naissent successivement à l'aisselle des 2^{ème} et 3^{ème} feuille de la tige principale ou le maître brin.

La phase du tallage herbacée est suivie par le stade montaison qui débute dès que l'épi du maître brin atteint une longueur de 1 cm, mesurée à partir de la base de la couronne ou plateau de tallage. C'est le stade épi-1cm qui fait suite à l'élongation du premier entre nœuds. La montaison est des phases les plus critiques du développement du blé. Les stress hydriques ou thermiques au cours de cette phase affectent le nombre d'épis montants par unité de surface (Fisher *et al.*, 1998). La phase de montaison se termine une fois l'épi prend sa forme définitive à l'intérieur de la gaine de la feuille étendard qui gonfle, ce qui correspond au stage gonflement.

Le stade épiaison débute par l'apparition de l'épi, hors de la gaine de la feuille drapeau. Les épis dégainés fleurissent généralement entre 4 à 8 jours après l'épiaison (Bahlouli *et al.*, 2005). Selon Abbassenne *et al.*, (1998), les basses températures au cours de cette phase réduisent fortement la fertilité des épis. Après la floraison, débute la phase de remplissage du grain au cours de laquelle le feuillage débute sa sénescence. L'azote et les sucres des feuilles, qui sénescent, sont remobilisés vers le grain (Barbottin *et al.*, 2005). L'évolution du poids du grain se fait en trois étapes : la première est une phase de multiplication des cellules du jeune grain encore vert, dont la teneur en eau est élevée. Cette phase est suivie par la phase de remplissage actif du grain avec les assimilats provenant de la photosynthèse de la feuille étendard et du transfert des hydrates de carbone stockés dans le col de l'épi (Belkherchouch *et al.*, 2009). Les fortes températures au cours de cette période provoquent l'arrêt de la migration des réserves des feuilles et de la tige vers le grain (Bahlouli *et al.*, 2005). Cette phase se termine une fois le contenu du grain atteint son maximum, le grain se dessèche progressivement, pour murir.

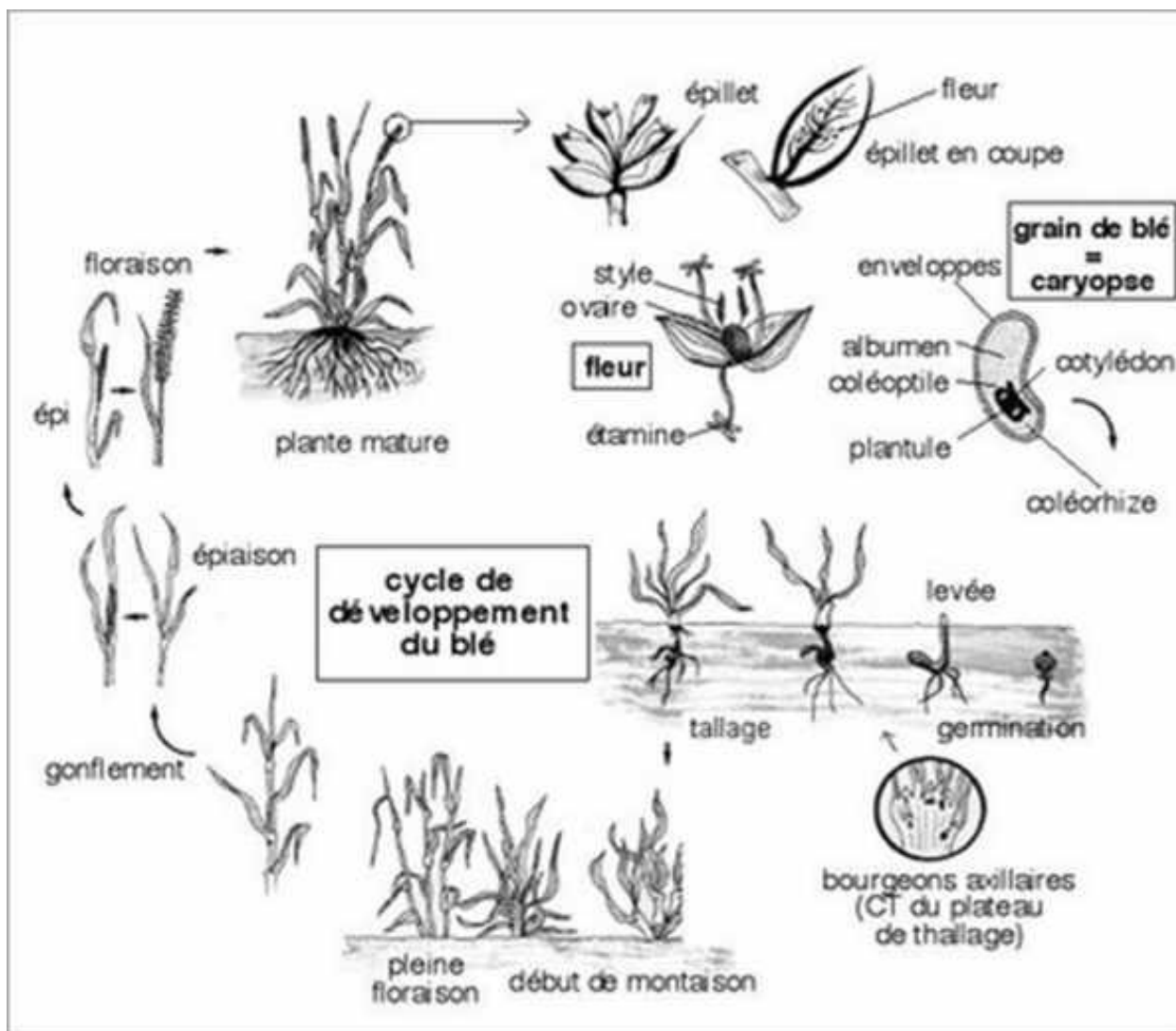


Figure 04. Schéma représentant le cycle de vie du blé dur (Trail, 2010).

I.1.6. Contraintes phytosanitaires

Une maladie de plantes peut être définie par une succession de réponses invisibles et/ou visibles à un microorganisme phytopathogène ou à la modification d'un facteur environnemental (température, pH, humidité et disponibilité d'oxygène), qui provoquent des bouleversements de forme, de fonction ou de l'intégrité de la plante. Il existe, de ce fait, deux types de maladies de plantes, à savoir : des maladies non infectieuses (abiotiques) ; et des maladies infectieuses (biotiques) causées par des champignons, des bactéries, des plantes supérieures parasites, des virus et viroïdes, des nématodes et des protozoaires (Sarah *et al*, 2008).

Dans ce cadre, le blé peut être attaqué par de nombreuses maladies à différents stades de son développement, ces attaques peuvent occasionner des pertes importantes lorsque les variétés

utilisées sont sensibles et les conditions de l'environnement sont favorables à l'expansion des maladies (Ezzahiri, 2001). Les deux principales causes de maladies du blé sont les champignons (*Fusarium culmorum*, *F. graminearum* et *Bipolaris sorokiniana*) et les virus (*Polymyxagraminis*), il peut également être touché par certaines bactérioses (*Pseudomonas syringae* pv. *Atrofaciens*) (Ruel, 2006). Les champignons parasites sont responsables de mycoses dénommées de façon trop générale « maladies cryptogamiques ».

De nombreuses espèces de *Fusarium* sont associées à ces maladies chez la plupart des céréales cultivées actuellement (Devaux, 1995). Les deux maladies les plus communes provoquées par les *Fusaria* sur les céréales à paille sont la gale de l'épi (fusariose de l'épi) et la pourriture racinaire (Zillinsky, 1983).

I.2. Maladies : pourriture racinaire

I.2.1. Agent pathogène « *Fusarium culmorum* »

Le *Fusarium culmorum* est parmi les champignons phytopathogènes les plus importants (Parry *et al.*, 1995; Walter *et al.*, 2010). Ce champignon tellurique, très ubiquitaire, et connu pour sa grande capacité saprophytique, est responsable de plusieurs maladies (fusarioses) dévastatrices. Ces fusarioses ont été reconnues comme les maladies les plus destructrices puisqu'elles touchent une large gamme d'hôtes dont la majorité sont des céréales (Parry *et al.*, 1995; Wagacha et Muthomi, 2007). Ces maladies peuvent survenir à tous les stades de développement de la plante, du semis à la récolte et des racines aux épis. Nous distinguons ainsi la fonte des semis et le dépérissement des jeunes plantules (damping-off et seedling blight), la brûlure de l'épi (head blight ou scab) et la pourriture des racines (root rot) (Nicholson *et al.*, 2004; Fernandez et Jefferson, 2004). Ces préjudices peuvent causer dans certains cas jusqu'à 50% de pertes de rendement (McMullen *et al.*, 1997; Dill-Macky et Jones, 2000). Les fusarioses des céréales provoquées par ce champignon au Maroc ont entraînés plus de 20% de pertes de rendement sur les cultures d'orge et 8,5% sur les cultures de blé. En Algérie, la maladie est aussi répandue mais les dégâts n'ont pas été encore évalués (Sayoud *et al.*, 1999; Yekkour *et al.*, 2012).

I.2.2. Caractères morphologiques

Le genre *Fusarium* tire son nom du latin « *Fusus* » en référence à ses spores qui sont en forme de fuseau. *F. culmorum* produit de courtes macroconidies qui prennent naissance à partir des sporodochies. Les macroconidies sont à parois épaisses et à surface ventrale et dorsale faiblement arquées, munies généralement de 3 à 5 cloisons (Figure 05). Les chlamydospores se forment

généralement de manière abondante et rapide, soit de façon isolée, soit en chaînes ou en touffes. Sur milieu PDA, la croissance est rapide, avec un mycélium aérien dense. Le mycélium est blanc ou jaune brunâtre. Lorsque la culture devient âgée (7 à 10 jours de culture), des sporodochies de couleur orange à rouge brunâtre apparaissent donnant ainsi une couleur rouge carmin visible au revers de la boîte de Pétri. La forme téléomorphe (sexuée) de ce champignon n'est pas connue (Champion, 1997).

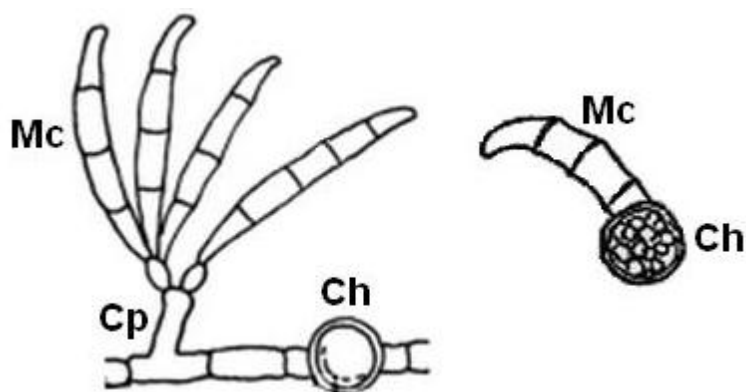


Figure 05. Schéma représentatif de la morphologie de *Fusarium culmorum*. Ch, chlamydospore; Cp, conidiophore, Mc, macroconidie. (Champion, 1997).

I.2.3. Position systématique

C'est un champignon qui appartient à la famille des Tuberculariaceae, à l'ordre des Moniliales et à la classe des Hyphomycètes. Les espèces appartenant à ce genre et possédant une forme sexuée se rapportent généralement aux Hypocréales (Ascomycota). Cependant, certains représentants, tels que *Fusarium culmorum*, ne possèdent pas de phase téléomorphe et se rapportent aux " *fungi imperfecti* " ou Deutéromycètes. Le genre *Fusarium* regroupe plus de 20 espèces (De Hoog et al., 2000).

Fusarium culmorum appartient à la section « discolor » (Leslie et Summerell, 2006). Les membres de cette section sont souvent désignés sous le nom de « *Fusarium* des céréales » en référence à leur présence fréquente et aux maladies qu'ils peuvent engendrer sur ce type de culture (Cavelier et al., 1992).

I.2.4. Cycle biologique

Les spores asexuées (conidies) sont la principale source de l'inoculum chez *Fusarium culmorum* (Schluter et al, 2006). Les conidies sont dispersées soit par le vent, soit par les éclaboussures de pluie vers les épis (Jenkinson et Parry, 1994; Fernando et al., 1997).

L'infection des épis de blé a principalement lieu au cours d'une courte période de grande sensibilité lors de l'anthèse (floraison mâle) (Bai et Shaner, 1996). Elle a lieu durant la floraison. Après germination, le tube germinal pénètre dans l'épillet et se développe sur les glumes, utilisant les nutriments disponibles. Le champignon pénètre ensuite dans la fleur et s'enfile dans les stomates, les blessures et les étamines (Mascher *et al*, 2005). Ces dernières sont le site préféré de pénétration parce qu'elles contiennent des composés qui stimulent la croissance des champignons (Strange et Smith 2012). Le mode d'infection peut toutefois varier d'une variété à l'autre. Quand l'épillet est infecté, le champignon se propage dans le reste de l'épi, soit à l'extérieur, soit à l'intérieur, en utilisant le système vasculaire. Ce dernier type de propagation peut provoquer l'interruption du flux de la sève vers les parties supérieures de l'épi.

I.2.5. Symptomatologie

Les symptômes les plus apparents des pourritures racinaires sont : la fonte des semis, le dépérissement des jeunes plantules, la brûlure de l'épi et la pourriture des racines (headblight ou scab) (Fernandez et Jefferson, 2004).

Les symptômes racinaires sous forme de plaques brunes en pourriture humide (Caron, 1993). Sur les feuilles se traduisent par des taches brunâtres ovales qui se dessèchent au bord. Lorsque l'attaque est sévère, les taches se rejoignent et induisent une déchirure de la feuille dans le sens longitudinal. Sur les plantes adultes, on observe une brûlure totale ou partielle des épis (Carver, 2009). Au niveau du grain lui-même, et selon la précocité de l'attaque, on peut être en présence d'une brûlure variable (Figure 06) (Dammer *et al.*, 2011).

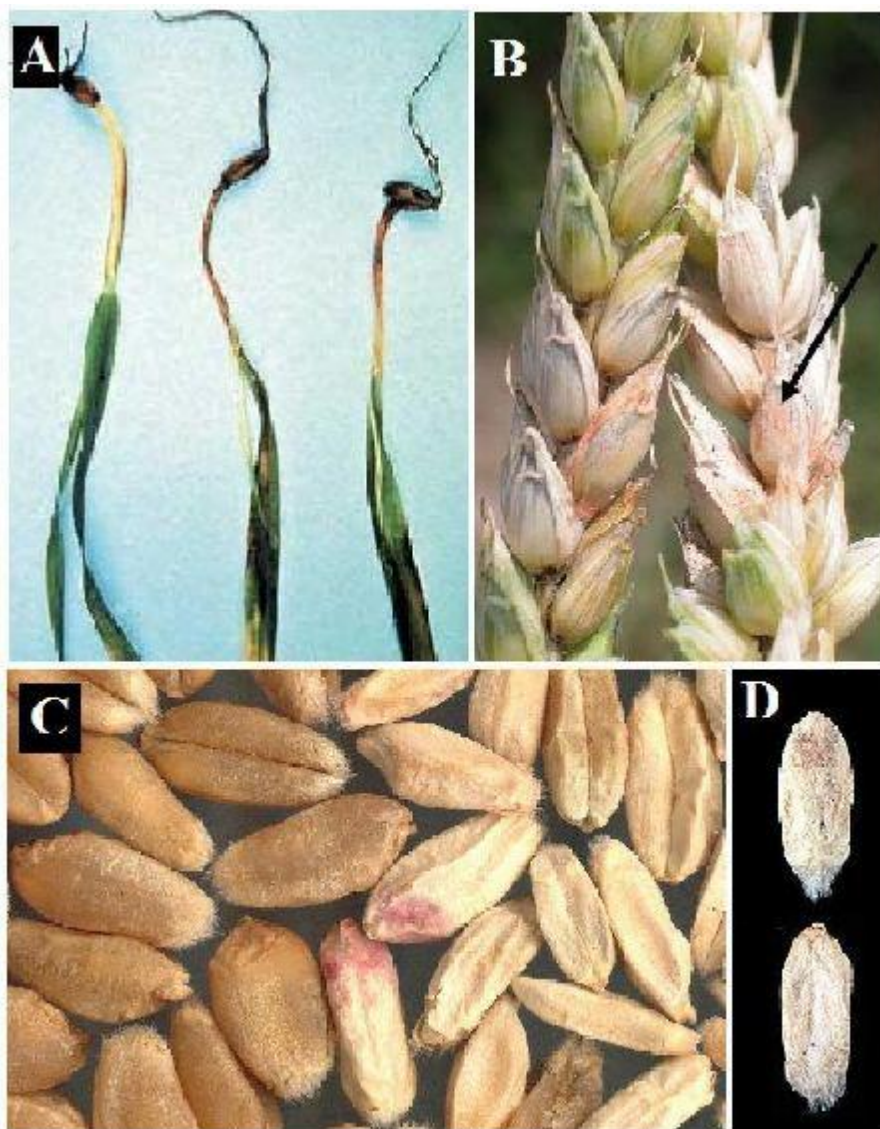


Figure 06. Symptômes de la fusariose observés chez le blé dur (Agrios, 2005).

I.2.6. Moyens de lutte

I.2.6.1. Lutte culturale

Les défauts rencontrés avec les précédentes méthodes a conduit aux pratiques culturales de gestion des fusarioses. Ces alternatives incluent la rotation des cultures, l'utilisation appropriée des engrais, l'irrigation, le désherbage, la préparation préalable du sol avant une culture et la moisson précoce (Wagacha et Muthomie, 2007).

Les *Fusarium* spp. qui infectent les céréales ont la capacité de survivre en saprophyte sur les débris végétaux (Parry *et al.*, 1995; Jones, 2000). Ainsi, les labours permettent d'enfouir les résidus de culture et suppriment la source d'inoculum disponible.

Une rotation mettant en œuvre une légumineuse entre une culture de maïs et une autre céréale laisse le temps à la population pathogène de décliner lors de la dégradation naturelle des résidus (Champeil *et al.*, 2004).

I.2.6.2. Lutte génétique

L'utilisation des variétés de blé résistantes aux *Fusarium* spp. peut être la méthode de lutte la plus écologique, la plus économique et la plus efficace.

Chez le blé, deux types de résistance ont été rapportés: la résistance à l'infection primaire et la résistance à la propagation de la maladie au sein de l'épi (Schroeder et Christensen, 1963). Kang et Buchenauer (2000) ont signalé que les cultivars résistants aux brûlures ont développé des réactions de défense active pendant l'infection et la propagation de *F. culmorum* dans les tissus de la plante hôte.

I.2.6.3. Lutte chimique

La lutte chimique utilise des pesticides (fongicides), prescrits par leurs fabricants comme les triazoles utilisés au moment de la floraison, limitent la fusariose sur l'épi des céréales et donc l'accumulation de toxines dans la plante.

Encore, pour l'ensemble des fongicides, une application homogénéisée, dans le temps approprié est indispensable pour la réussite de traitement (Yuen, 2007).

Parmi les fongicides chimiques utilisés en Algérie pour lutter contre *Fusarium culmorum*, le Dividend 030FS (Difénoconazole) qui est le plus répandu comme traitement de semence, Vitaflo 280 (Carbathiine, Thitame) et Raxil PRO MD (Tébuconazole, métalaxylprothioconazole) (Index phytosanitaires, 2015).

I.2.6.4. Lutte biologique

La lutte biologique est définie comme « l'utilisation d'organismes vivants, ou des produits de leurs gènes, pour limiter ou supprimer les activités et les populations de pathogènes » (Fravel, 2005 ; Paulitz et Bélanger, 2001).

L'application des agents de lutte biologique sur les cultures présente plusieurs avantages, les plus importants sont l'absence d'effets secondaires nocifs (absence de résidus chimiques, de pollution chimique) et de danger pour l'environnement ou sur les cultures, car les biopesticides sont spécifiques à l'espèce-cible (Meyer, 2002).

De plus, les biopesticides sont souvent efficaces en faible quantité et leurs activités protectrices peuvent relever de mécanismes multiples déclenchant rarement ainsi des phénomènes de résistance chez le pathogène grâce à une faible pression de sélection (Fravel, 2005 ; Thakore, 2006).

Plusieurs microorganismes du sol appartiennent aux genres *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Agrobacterium* et *Streptomyces* ont été utilisés pour lutter contre les agents phytopathogènes. Ces microorganismes jouent un rôle important dans la protection de la plante (Benizri *et al.*, 2001), au titre d'exemples, les actinobactéries utilisés comme antagonistes naturels de plusieurs champignons phytopathogènes tels le cas de *Fusarium culmorum* (Rakotoarimanga *et al.*, 2014).

I.3. Actinobactéries

I.3.1. Généralités

Morphologiquement, les actinobactéries peuvent être classés en deux groupes. Le premier se compose d'organismes qui ne présentent pas de caractéristiques morphologiques particulières et forme seulement une masse de filaments ramifié. Le second comprend les organismes qui sont morphologiquement plus complexes que le premier (Lechevalier et Lechevalier, 1985). Les colonies formées par les actinobactéries sur des milieux solides présentent différents aspects macroscopiques qui peuvent être regroupés en trois types :

- Des colonies poudreuses couvertes d'hyphes aériens fermement attachés au milieu ;
- Des colonies pâteuses qui peuvent être facilement détachées des milieux solides ;
- Des colonies exemptes de mycélium de substrat et se composent d'hyphes aériens attachés au milieu par des crampons.

Les différents genres actinobactéries peuvent sporuler soit en morcelant certaines hyphes pour former des conidies, un peu plus résistantes aux conditions hostiles que les hyphes, soit en produisant des endospores (*Thermoactinomyces*). D'autres genres actinobactéries sporulent en produisant des sporanges tels que le genre *Streptosporangium* (Kalakoutskii et Agre, 1976).

Les spores peuvent, selon les genres, être produites isolément (*Micromonospora*), deux à deux longitudinalement (*Microbispora*), en courtes chaînes (*Actinomadura*), en longues chaînettes (*Streptomyces*). Les chaînettes de spores peuvent être ramifiées ou non, droites, flexibles ou en spirales (Figure 07). De plus, elles peuvent être rayonnantes autour d'hyphes sporophores. La majorité des actinobactéries cultivés sur milieu solide forment un mycélium de substrat et un mycélium aérien. Néanmoins, il existe des groupes qui ne forment qu'un mycélium de substrat

poussant à la surface et dans le milieu de culture ou un mycélium aérien dont les hyphes sont attachés au milieu par des crampons (Holdfasts, 2002).

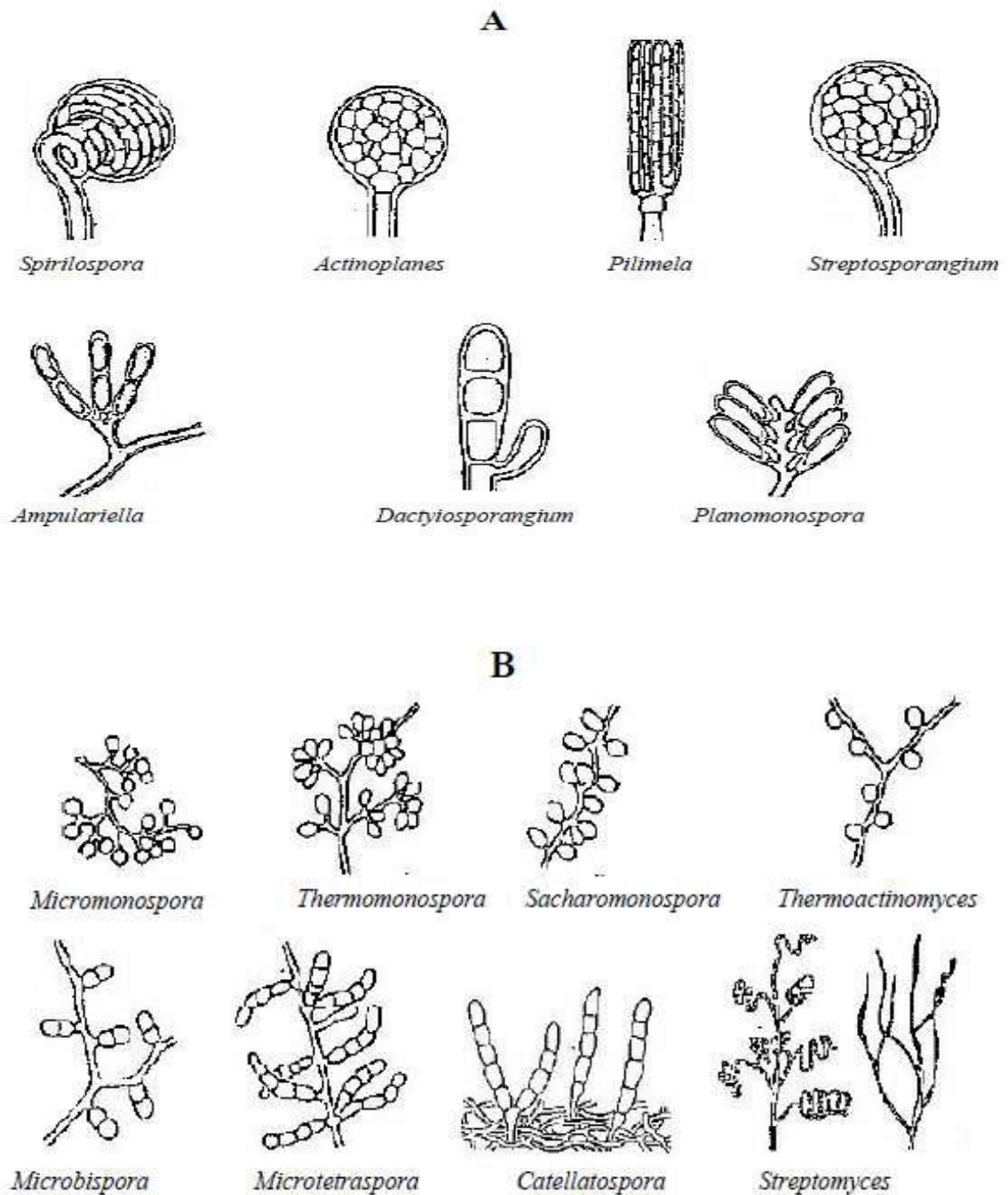


Figure 07. Différentes chaînes de spores chez les actinobactéries (Breton *et al*, 1989).

I.3.2. Taxonomie

Les actinobactéries appartiennent au règne des procaryotes, à la division des Firmicute. Selon Lechevalier et Lechevalier (1965), la position taxonomique des actinobactéries (en prenant comme exemple *Streptomyces griseus*) s'établit comme suit :

Classe : Actinobacteria

Ordre : Actinomycetales

Sous-Ordre : Streptomycineae

Famille : Streptomycetaceae

Genre : *Streptomyces*

Espèce : *Streptomyces griseus*

La classification hiérarchique des actinobactéries ne change pas les descriptions courantes des espèces et des genres. En effet, leur classification, basée sur des caractéristiques morphologiques, chimio-taxonomiques ou physiologiques, a été vérifiée pendant ces 20 dernières années, et il s'est avéré qu'elle est en accord avec le regroupement phylogénétique basé sur l'ADN /ARNr 16S (Stackebrandt, 2010).

I.3.3. Cycle biologique

Les actinobactéries possèdent une structure de procaryotes, mais un cycle biologique semblable à certains champignons (Floyd *et al.*, 1987; Sanglier et Trujillo, 1997). Le cycle de développement des *Streptomyces* débute par la germination des spores, il comprend quatre étapes : l'activation, l'initiation, l'émergence du tube germinatif et enfin la croissance. Parfois, l'activation peut être déclenchée par un choc thermique, par exemple un traitement de 5 minutes à 50°C pour les spores de *Streptomyces viridochromogenes*, puis le tube de germination croît et donne des hyphes non séptés et plurinucléés, ramifiés et ancrés dans le milieu solide appelés le mycélium primaire, de substrat ou végétatif. Sur ce mycélium primaire, se développera, ensuite, un mycélium aérien ou secondaire composé d'hyphes dressés sur le mycélium de substrat, leurs extrémités se cloisonnent et se différencient pour former des chaînes de spores uninucléées (Figure 08) (Hopwood *et al.*, 1985).

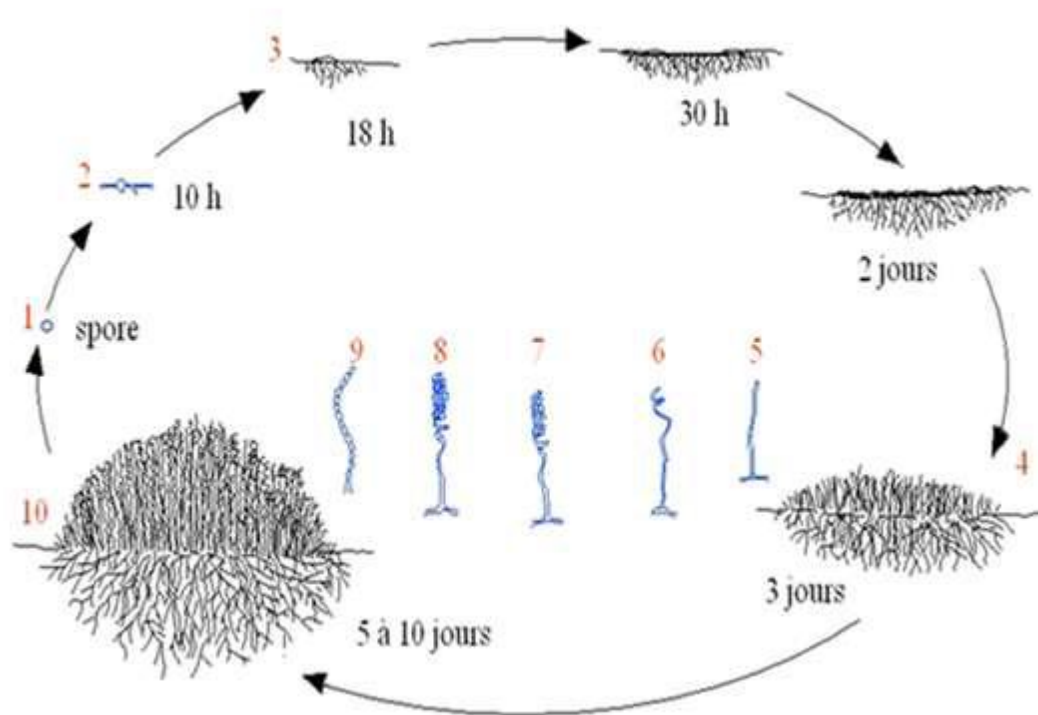


Figure 08. Cycle de développement des *Streptomyces* sur milieu solide (Hopwood *et al.*, 1985).

I.3.4. Importance

I.3.4.1. En biotechnologie

Les actinobactéries constituent une source importante d'antibiotiques et d'autres métabolites secondaires à utilité industrielle (Takahashi et Omura, 2003; Hayakawa *et al.*, 2004). Plus de 70% des antibiotiques d'origine microbienne sont produits par ce vaste groupe bactérien (Gundliffe, 2006). Les actinobactéries produisent un grand nombre d'antibiotiques de structures chimiques très variées (aminoglycosides, anthracyclines, glycopeptides, beta-lactamines, macrolides, etc...) qui ont de nombreuses applications thérapeutiques (Okami et Hotta, 1988).

Le genre *Streptomyces* a été largement exploré pour la sélection des agents de biocontrôle (El-Tarabily et Sivasithamparam, 2006) et 75% des antibiotiques sont produits par les membres de ce genre.

I.3.4.2. Dans le domaine agronomique

Les actinobactéries ont un rôle important dans l'amélioration de la qualité du sol agricole. En effet, ils contribuent à la fertilisation du sol. Ils contribuent aux processus du recyclage et de la

biodégradation de la matière organique et des éléments minéraux (Goodfellow *et al.*, 1984). Les actinobactéries ont un grand pouvoir de transformation des substances organiques complexes difficilement dégradables ou non, par les autres microorganismes, comme les polymères complexes: les polysaccharides, les lignocelluloses, la chitine (Goodfellow et Williams, 1983).

Le genre *Frankia* s'intègre aux racines avec plus de 200 espèces des angiospermes, fixe l'azote et joue un rôle dans la protection des plantes contre les pathogènes (Sardi *et al.*, 1992; Thirupl *et al.*, 2001; Pawlowski et Sirrenberg, 2003).

Ces bactéries contribuent également au maintien d'une bonne structure du sol. En effet, leur structure filamenteuse ainsi que la production des polysaccharides permettent le maintien entre les particules du sol (Kennedy, 1999). Ils améliorent aussi l'infiltration de l'eau dans le sol et permettent ainsi une bonne aération du sol (Mckenna *et al.*, 2002).

Outre la structure et la fertilité du sol, les actinobactéries augmentent le pouvoir suppressif du sol. Mazzola (2002), a montré qu'un sol riche en actinobactéries est suppressif aux maladies phytopathogènes qu'un sol pauvre de ces bactéries (Errakhi, 2008).

I.3.5. Ecologie

Ecologiquement, il existe deux groupes d'actinobactéries. En premier lieu, les formes fermentatives, anaérobies strictes ou facultatives, illustrées par le genre *Actinomyces*. Ces organismes sont des saprophytes obligés des cavités naturelles de l'homme et des animaux supérieurs et ils ne sont jamais retrouvés dans le sol (Mariat et Sebald, 1990). En second lieu, les formes oxydatives, aérobies, tels que les *Streptomyces* où le sol est leur réservoir principal et à partir duquel elles sont disséminées, en particulier dans l'air (Reponen *et al.*, 1998). Les *Streptomyces* disséminés dans les eaux douces et salées, s'adaptent en formant des spores résistantes caractérisées soit par une psychrophilie, soit par une halophilie ou par une barotolérance (Mincer *et al.*, 2002; Zaitlin *et al.*, 2003). Certains genres d'actinobactéries ont été isolés à partir des composts (Lacey, 1997; Song *et al.*, 2001). Quelques espèces d'actinobactéries sont des symbiotes de plantes (Larpen et Larpen-Gourgau, 1985). Le genre *Frankia* s'intègre aux racines, fixe l'azote et joue un rôle dans la protection des plantes contre les pathogènes (Sardi *et al.*, 1992; Thirupl *et al.*, 2001).

En général, les actinobactéries sont des chimioorganotrophes utilisant une grande variété de sources d'énergie y compris les polymères complexes. Mais plusieurs espèces sont capables aussi

de croissance chimioautotrophique utilisant l'oxydation de l'hydrogène comme source d'énergie et le gaz carbonique comme source de carbone (Mariat et Sebald, 1990).

I.3.6. Interaction actinobactéries-plante

En lutte biologique l'efficacité d'une souche donnée est basée sur son potentiel à coloniser efficacement le système racinaire et la couche environnante du sol (rhizosphère). Cela signifie qu'elle doit être dominante par rapport aux autres populations microbiennes et qu'elle persiste sous les faibles ressources nutritionnelles disponibles dans le micro environnement (Van Den Broek *et al.*, 2003 ; Bloemberg *et al.*, 2001).

En effet, les actinobactéries sont des bactéries saprophytes capables de dégrader la matière organique dans le sol et d'utiliser des molécules plus complexes pour leur croissance (Lechevalier et Lechevalier, 1970). Ceci leur permet de s'adapter et de coloniser différents milieux rhizosphériques. Cette caractéristique est essentielle dans la lutte biologique. Ainsi, les actinobactéries peuvent agir par différents mécanismes d'antagonisme, comme l'antibiose, la compétition nutritionnelle ou spatiale ou encore le parasitisme (Errakhi, 2008). Ils ont la capacité de parasiter des champignons en produisant des enzymes qui leur permettent de dégrader la paroi des cellules fongiques (Mahadevan et Crawford, 1997).

Le parasitisme des mycéliums de champignons par les actinobactéries a été décrit dans plusieurs travaux (El-Tarabily et Sivasithampar, 2006 ; Errakhi *et al.*, 2007 ; Jain et Jain, 2007).

En revanche, certaines espèces des actinobactéries sont symbiotiques des plantes supérieures. Ces bactéries endophytes forment des associations appelées actinorhizes permettant la fixation d'azote. Le genre *Frankia* établit une association symbiotique avec plusieurs phanérogames. L'exemple le plus connu est l'aulne (*Alnus*) où ces actinobactéries forment au niveau des racines, des nodules où l'azote gazeux est fixé grâce à une nitrogénase (Baker, 1988).

I.3.7. Utilisation des actinobactéries en lutte biologique

I.3.7.1. Mécanismes impliqués dans le biocontrôle

I.3.7.1.1. Activité antagoniste

L'activité antagoniste de *Streptomyces* vis-à-vis des pathogènes fongiques est généralement liée à la production de composés antifongiques extracellulaires et des enzymes hydrolytiques (Prapagdee *et al.*, 2008). D'autres genres appartenant aux actinobactéries sont également des producteurs de molécules possédant des activités antifongiques (Trujillo, 1997).

I.3.7.1.2. Production des enzymes lytiques

Les actinobactéries synthétisent des chitinases, des glucanases, des peroxydases (Tokala *et al.*, 2002) et des glutaminases (DivyaTeja *et al.*, 2014). Des espèces de *Streptomyces* produisent des amylases, des cellulases et des hémi-cellulases. D'autres sont capables de dégrader la lignine. *Streptosporangium* sp. isolé à partir des feuilles de maïs produit des glucoamylases exploitées en industrie afin de dégrader l'amidon (Hasegawa *et al.*, 2006). Les lipases sont aussi produites par certaines souches actinomycétales, ces enzymes catalysent l'hydrolyse des triglycérides en diglycérides, en monoglycérides, en glycérol et en acides gras (Sommer *et al.*, 1997). La production d'enzymes chénotiques (chitinases et cellulases) par *Streptomyces albobacillus*, *S. caviscabies*, *S. griseus*, *S. setonii* et *S. virginiae* est considérée comme l'action antagoniste la plus efficace dans le contrôle de certaines maladies fongiques en raison de leur action directe sur les chitinases (Macagnan *et al.*, 2008). Les protéases sont parmi les enzymes les plus importantes, elles constituent plus de 65% des applications industrielles totales comme agents blanchisseurs dans les détergents ou dans la synthèse des peptides. *Nocardopsis* sp. NCIM 5142 et *Streptomyces pactum* DSM 40530 sont parmi les actinobactéries les plus exploitées dans la production des peptides (Thumar et Singh, 2007).

I.3.7.1.3. Production des sidérophores

Le fer est considéré comme le micro-élément le plus important utilisé par les bactéries, il joue également le rôle de cofacteur de nombreuses enzymes et protéines (Djibaoui et Bensoltane, 2005). Dans des conditions aérobies à pH neutre ou alcalin, cet élément est retrouvé dans la nature sous des formes insolubles dont elles ne peuvent pas être assimilées par les plantes et les bactéries. Ces dernières ont développé de nombreux systèmes de chélation de fer à partir de l'environnement qui utilisent le plus souvent les sidérophores ayant l'affinité la plus élevée pour le fer. Les sidérophores sont des molécules de faible poids moléculaire secrétées par de nombreux champignons et bactéries en réponse à la carence en fer (Pérez-Miranda *et al.*, 2007). Ils solubilisent et transportent le fer vers la cellule microbienne à travers des récepteurs spécifiques (Cabrera *et al.*, 2001; Sridevi *et al.*, 2008). Les streptomycètes du sol sont capables de produire les sidérophores (Muller *et al.*, 1984). *Streptomyces fulvissimus* ATCC 27431 en accumule à un taux avoisinant 94% (Bendale *et al.*, 2009).

I.3.7.1.4. Production de l'acide cyanhydrique (HCN)

Certains gaz volatiles comme l'HCN (antibiotique), sont connus par leur action négative sur les champignons phytopathogènes. La production de l'HCN est une activité très commune chez les espèces appartient au genre *Streptomyces* (Schippers *et al.*, 1990). Defago *et al.* (1990), suggèrent que la production de l'acide cyanhydrique provoquerait sur la plante un stress auquel elle réagirait par un développement de son système racinaire et de sa résistance naturelle (Lemanceau, 1991).

I.3.7.1.5. Induction de la résistance systémique

Des microorganismes de lutte biologique sont capables de déclencher une résistance systémique induite (ISR) chez la plante hôte, ce qui peut rendre l'hôte plus résistant à l'agression future par des agents pathogènes (Jijakli, 2003). L'induction des systèmes de résistance chez la plante a été démontrée pour la première fois par kempe et Sequira (1983). Ces derniers ont remarqué que des pré-traitements par des bactéries (*Streptomyces griseoviridis* et *S.lydicus*) ont protégé des tubercules de pomme de terre des infections de *Pseudomonas solanacearum*.

Le microorganisme antagoniste peut consister en une souche avirulente occupant la même niche écologique qu'un agent pathogène. L'induction des systèmes de résistance se manifeste par des modifications au niveau de la composition des parois cellulaires ou la libération des éliciteurs. Ces derniers sont des substances qui stimulent les mécanismes de défense de la plante. Celle-ci produira alors des phytoalexines et des protéines PR qui lui confèrent une résistance systémique (Agrios, 1988; Toussaint, 1996).

I.3.7.2. Mécanismes impliqués dans l'effet PGPB

I.3.7.2.1. Solubilisation des phosphates inorganiques

Le phosphore est considéré comme l'un des éléments essentiels limitant la production agricole, sa teneur dans le sol est estimée à 400-1200 mg/Kg (Fernandez et Novo, 1988). Il est présent sous forme de composés métalliques liés au fer, à l'aluminium, ou au silicium dans les sols acides ou avec le carbonate de calcium dans les sols alcalins (Whitelaw, 2000). Afin de compenser cette pauvreté naturelle en phosphore, ce dernier est ajouté au sol sous formes de fertilisants phosphorés dont seulement 1% est utilisé par les plantes, le reste est rapidement converti en composés insolubles tels que les phosphates calcique et ferrique. Pour cette raison, les microorganismes solubilisant les phosphates ont un intérêt particulier (Yadav *et al.*, 2011), les

bactéries et les levures sont les plus performants (Sahu *et al.*, 2007). Parmi les bactéries possédant cette activité, les actinobactéries occupent une place de choix (Jiang *et al.*, 2005). Les mines marocaines, par exemple, sont riches en phosphore et constituent alors de bons sites pour l'isolement de ces bactéries (Hamdali *et al.*, 2008). *Micromonospora aurantica* et *S. griseus* (Hamdali *et al.*, 2008) et *S. lividans* (Hamdali *et al.*, 2010) isolés à partir des mines marocaines solubilisent efficacement le phosphore et améliorent sensiblement le poids frais des tiges et des racines (Hamdali *et al.*, 2008). Certaines actinobactéries possèdent une capacité importante de produire des phosphatases alcalines (Ghorbani-Nasrabadi *et al.*, 2013). *Micromonospora endolithica* par exemple, solubilise des quantités importantes de phosphore et produit des phosphatases alcalines et acides, à ceci s'ajoute sa capacité de coloniser *Phaseolus vulgaris* L. (El-Tarabily *et al.*, 2008).

I.3.7.2.2. Production de l'ammoniaque

Parmi les éléments nutritifs nécessaires, et celui qui est le plus souvent limitant pour la croissance des plantes est l'azote. La majeure partie de cet élément se trouve sous forme d'azote gazeux (N₂) inaccessible aux plantes (Pujie et Normand, 2009). L'azote représente environ 2% de la matière sèche totale de la plante qui entre dans la chaîne alimentaire. Néanmoins, les plantes ne peuvent pas accéder directement au gaz nitreux, qui représente environ 80% de l'ammonium et de nitrates. Plusieurs recherches ont montré que les actinobactéries ont des effets bénéfiques sur les plantes, en procurant à la plante l'azote sous forme d'ammonium par leurs associations avec les légumineuses et certaines graminées (Benmati *et al.*, 2012).

I.3.7.2.3. Production des phytohormones

Les actinobactéries sont capables de produire des phytohormones tel que les auxines et les gibbérellines (Ahmed *et al.*, 2005). Parmi les auxines, l'Acide Indole-3-Acétique (AIA) qui stimule la germination des graines de blé et joue un rôle essentiel dans l'élongation racinaire, la formation des racines latérales et la croissance et le développement des plantes par son effet sur la division cellulaire (Duca *et al.*, 2014). Les gibbérellines synthétisées par des actinobactéries endophytes sont transportées pour contrôler la croissance des organes floraux et des fruits (Kaneko *et al.*, 2003).

Durant ces dernières années, plusieurs espèces d'actinobactéries endophytes, notamment ceux appartenant aux genres *Streptomyces*, *Nocardia*, *Amiclatopsis*, *Micromonospora* et

Microbispora, ont été étudiées pour leur faculté à produire des phytohormones et pour leur rôle dans la promotion de la croissance des plantes cultivées. Parmi ces genres, certaines espèces ont été formulées et commercialisées en tant que biopesticides à effet *PGPB* (Cao *et al.*, 2005; Shi *et al.*, 2009; Ruanpanun *et al.*, 2010).

I.3.8. Formulation des biofongicides à base des spores d'actinobactéries

De nombreux agents de lutte biologique ont été formulés dans divers formes liquides, solides et en poudre mouillables pour contrôler des agents phytopathogènes (Lewis, 1991 ; Lumsden *et al.*, 1995). Parmi les biofongicides formulés à base d'actinobactéries nous pouvons citer l'Actinovate®, l'Actino-Iron® et le Mycostop®.

L'Actinovate®, formulé à base de l'isolat (*Streptomyces lydicus* isolat WYEC 108), est un biofongicide qui permet de réprimer de la pourriture grise et l'oïdium des fraises, aussi la pourriture blanche des cucurbitacées et de la tomate. Ce biofongicide peut diminuer des symptômes de pourriture de fruit, et également remédier le flétrissement fusarien sur les cyclamens, le pourridié pythien sur les pétunias, la pourriture des racines et du collet causé par *Rhizoctonia* sur les géraniums et le blanc sur les verbans, la pourriture racinaire du blé causé par *F. culmorum* (RAP, 2014 ; Toumatia, 2015).

L'Actino-Iron®, est un biofongicide fabriqué à base de l'isolat (*Streptomyces lydicus* isolat WYEC 108) hautement concentré sur un support en fer et en acide humique. Il protège les racines contre l'agent pathogène appartenant au genre : *Pythium*, *Phytophthora*, *Fusarium*, *Rhizoctonia* et autre maladies à racines (Mediak, 1995).

Le Mycostop® WP, un biofongicide appliqué sous forme d'eau ou de pulvérisation, il est fiable pour contrôler la fonte de semis, les maladies racinaires et les flétrissements. En plus, il stimule la croissance et induit les mécanismes de défense des plantes. Il est efficace dans les milieux de culture organique et de synthèse (Verdera, 2014). Ce biofongicide est formulé à base d'isolat (*Streptomyces griseoviridis* isolat K61).

Partie II :

Matériel et méthodes

II. Matériel et méthodes

II.1. Matériel biologique

II.1.1. Blé dur

Des semences de blé dur (*Triticum durum*) de la variété Vitron (Figure 09) fournies par l'ITGC de SETIF ont été utilisées dans ce travail.

La variété Vitron est sélectionnée au niveau du CIMMYT (Centre International d'Amélioration de Maïs et de Blé) de Mexique, et elle est originaire d'Espagne. Elle a été introduite en Algérie par l'ITGC en 1986 et sélectionnée au niveau de la station expérimentale de Tiaret. C'est une variété demi-précoce, assez sensible à la rouille brune et à la fusariose. Elle est productive (50 à 60 qx/ha en sec) et présente un épi fertile (50 à 60 grains/ épi) et un gros grain (ITGC, 1998).



Figure 09. Graines de blé dur de la variété Vitron (Originale, 2019).

II.1.2. Agent phytopathogène

L'isolat *Fusarium culmorum* utilisé pour notre travail a été fourni par le laboratoire de microbiologie de l'université de Laghouat. Cet isolat a été purifié sur le milieu de culture PDA (*Potato Dextrose Agar*) et conservé à 4°C (Toumatia, 2015).

II.1.3. Agents debiocontrôle

Un total de huit isolats d'actinobactéries est utilisé dans notre travail. Ces isolats ont été obtenus à partir des racines de plusieurs plantes spontanées et purifiées sur le milieu de culture ISP2 (*International Streptomyces Project*), et identifiées au niveau du laboratoire de microbiologie de département d'agronomie de l'Université de Laghouat. Ces isolats sont assignés au genre *Streptomyces*, ils sont nommés selon le tableau 01 (Taibaoui, 2016).

Tableau 01. Origine d'isolement des souches d'actinobactéries

Isolats	Origine d'isolement	Genre
AR2	<i>Astragallusarmatus</i>	<i>Streptomyces</i>
DN4	<i>Phoenix dactylifera</i>	<i>Streptomyces</i>
ML2	<i>Medicagolaciniata</i>	<i>Streptomyces</i>
PT2	<i>Panicum turgidum</i>	<i>Streptomyces</i>
SN2	<i>Solanumnigrum</i>	<i>Streptomyces</i>
SN6	<i>Solanumnigrum</i>	<i>Streptomyces</i>
TL8	<i>Terfezialeonis</i>	<i>Streptomyces</i>
ZL2	<i>Ziziphus lotus</i>	<i>Streptomyces</i>

II.2. Méthodes d'étude

II.2.1. Repiquage et conservation des microorganismes

II.2.1.1. Isolats fongiques

Les isolats fongiques sont purifiés par repiquages successifs sur milieu PDA jusqu'à l'obtention d'une culture pure. Cette pureté est observée par observation microscopique des colonies (Toumatia, 2015).

II.2.1.2. Isolats d'actinobactéries

Les isolats d'actinobactéries sont repiqués successivement dans des boîtes de Pétri contenant le milieu ISP2. Les boîtes sont ensuite incubées à 30°C pendant 7 jours avant d'être conservées à 4 °C (Boudemagh, 2007).

II.2.2. Test d'antibiose

La méthode des stries croisées utilisée par Zitouni *et al.*, (2005) est adoptée dans le but d'étudier l'activité antifongique des isolats d'actinobactéries vis-à-vis de neuf champignons phytopathogènes et toxinogènes (Tableau 02).

Tableau 2. Champignons cibles utilisés pour étudier l'activité antifongique.

Champignons cibles	Nom scientifique
Fc	<i>FusariumCulmorum</i>
Fg	<i>Fusariumgraminearum</i>
Fs	<i>Fusariumsolani</i>

Fol	<i>Fusariumoxysporumf. sp. lycopersici</i>
Forl	<i>Fusariumoxysporumf. sp. radicis-lycopersici</i>
Rs	<i>Rhizoctoniasolani</i>
Af	<i>Aspergillus flavus</i>
Aal	<i>Aspergillus alliaceous</i>
Ap	<i>Aspergillus parasiticus</i>

La méthode des stries croisées (Figure 10) consiste à ensemencer l'isolat de l'actinobactérie en un seul trait horizontal en bordure de la boîte de Pétri contenant le milieu ISP2. Après incubation à 30°C pendant 7 jours, les champignons cibles sont ensemencés en strie perpendiculaire à celle de l'actinobactérie. Les boîtes de Pétri sont ensuite ré-incubées à 30°C pendant 5 jours. La zone d'inhibition est évaluée en (mm) et mesurée à l'aide d'un pied à coulisse entre les limites de la croissance de l'actinobactérie et la croissance mycélienne de chaque champignon cible. Une culture témoin de l'agent phytopathogène (*F. culmorum*) dans les mêmes conditions est effectuée en absence de l'actinobactérie.

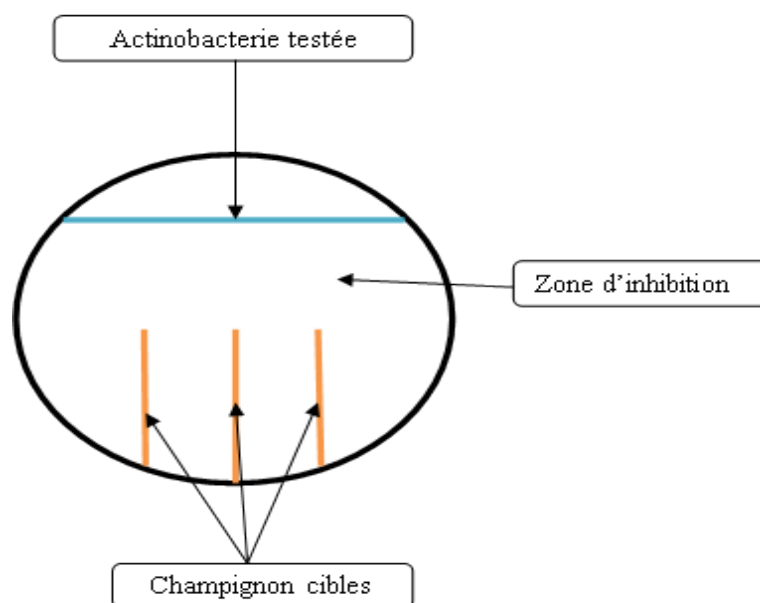


Figure 10. Schéma représentant la méthode des stries croisées (Originale, 2019).

II.2.3. Test du Pouvoir colonisateur racinaire

La méthode décrite par Cao *et al.* (2004), a été utilisée pour étudier le pouvoir des actinobactéries à coloniser le système racinaire du blé dur.

II.2.3.1. Désinfection superficielle des grains de blé dur

Le but de la désinfection superficielle des grains (Figure 11), est d'éliminer toutes les pollutions externes d'origine fongique ou bactérienne.

Les graines de blé dur sont désinfectées selon la méthode de Cao *et al.*, (2004). Cette méthode consiste à un trempage pendant 5 minutes des graines dans un cristalliseur contenant une solution d'hypochlorite de sodium à 0,09%, puis un trempage dans un cristalliseur contenant de l'éthanol à 70% pendant 20 min, suivie de trois rinçages successifs par l'eau distillée stérile pendant 3 min. Les graines sont ensuite égouttées et séchées sur un papier filtre stérile avant d'être semées le jour même.



A. Solution de désinfection superficielle B. Trempage de blé dur



C. Récupérations des semences stériles

D. Séchage sur un papier filtre stérile

Figure 11. Photographies représentant la méthode de la désinfection superficielle des grains du blé dur (Originale, 2019).

II.2.3.2. Semis des grains de blé dur

Les graines du blé dur désinfectées superficiellement, ont été déposées dans des boîtes de Pétri stériles contenant un disque de papier Whatman N°01 stérile (à 180 °C pendant 15 min au four Pasteur), à raison de dix graines par boîte (Figure 12). Ces dernières ont été humidifiées par imbibition avec l'eau distillée stérilisée. Ensuite ont été déposées dans un phytotron ($T = 25^{\circ}\text{C}$, $H = 70\%$) avec une photopériode (12h/12h). Les graines ont été irriguées avec l'eau de robinet stérilisée à raison de 3 ml pour chaque boîte.



Figure 12. Culture des grains de blé dur dans le phytotron (Originale, 2019).

II.2.3.3. Préparation des suspensions de spores

La méthode décrite par Toumatia (2015), est utilisée pour préparer la suspension des spores des actinobactéries. Cette méthode consiste à ensemencer les actinobactéries en stries serrées sur toute la surface des boîtes de Pétri contenant le milieu ISP2. Après incubation à 30 °C pendant 10 jours, les suspensions des spores ont été préparées par un raclage de la surface de la culture des actinobactéries avec une anse en platine en conditions d'asepsie afin d'éliminer toute possibilité de contamination (Figure 13). Les spores ont été récupérées à l'aide d'une solution d'eau distillée stérilisée 0,05% de Tween 80 préalablement ajoutée à la surface des cultures en boîte de Pétri. La suspension mère est récupérée dans un tube à essai stérilisé. Le dénombrement des spores a été réalisé à l'aide d'une cellule de Thomas. Les concentrations des suspensions de spores ont été ajustées à environ 10^6 UFC/ml.



Figure 13. Méthode de préparation des suspensions des spores d'actinobactéries (Originale, 2019).

La suspension de spores de l'agent phytopathogène *Fusarium culmorum* a été préparée selon la même méthode utilisée pour les actinobactéries. La concentration est ensuite ajustée à environ 10^4 UFC/ml.

II.2.3.4. Bactérisation des plantules du blé dur

Après l'obtention des plantules du blé dur, les racines ont subi un rinçage avec de l'eau distillée stérilisée et une désinfection superficielle selon le protocole décrit par Cao *et al.* (2004), puis un découpage des extrémités racinaires des plantules à l'aide d'un ciseau stérilisé (stérilisé au four pasteur pendant 15min). La bactérisation des racines a été effectuée par trempage dans une suspension des spores de chacune des souches d'actinobactéries pendant 24 heures (Figure 14). Les plantules ont été exposées à une source de lumière pour favoriser l'absorption de la suspension des spores. L'objectif de cette méthode est de vérifier le pouvoir des actinobactéries à coloniser les tissus racinaires des plantules de blé dur.



Figure 14. Trempage des racines dans les suspensions des spores des actinobactéries testées.

II.2.3.5. Transplantation des plantules du blé dur dans la perlite

Après trempage des racines dans les suspensions de spores d'actinobactéries, les plantules sont ensuite transplantées (Figure 15) dans la perlite stérilisée par autoclavage, et mise en culture dans un phytotron ($T = 25^{\circ}\text{C}$, $H = 70\%$ et une photopériode de 12h/12h). L'irrigation est réalisée 4 fois par semaine à raison de 10 ml d'eau de robinet stérilisé pour chaque pot.



Figure 15. Transplantation des plantules de blé dur dans la perlite stérile.

II.2.3.6. Re-isollement des actinobactéries

Après un mois de culture, les plantules de blé dur sont dépotées et rincées à l'eau de robinet pour éliminer les particules de la perlite. Les racines, les feuilles ainsi que les tiges ont subi une désinfection superficielle (selon la même méthode utilisée pour désinfecter les graines de blé), puis coupées en petits morceaux et déposées dans des boîtes de Pétri contenant le milieu ISP2 (Figure 16) et portées en incubation dans l'étuve à 30°C pour le ré-isollement d'éventuels actinobactéries.



Figure 16. Photographie montrant le découpage des racines des plantules de blé dur.

II.2.4. Sélection des isolats d'actinobactéries performants

Les meilleurs isolats d'actinobactéries qui ont un pouvoir colonisateur des racines des plantules de blé dur et un effet important d'antagonisme *in vitro* vis-à-vis de *Fusarium culmorum*, sont retenus pour un essai de formulation de biofongicides qui sont appliqués dans le biocontrôle de *F. culmorum* dans des conditions de cultures *in vivo*.

II.2.5. Formulation des biofongicides à base des spores d'actinobactéries sélectionnés

Les spores des isolats d'actinobactéries performants qui ont donné des résultats positifs sont formulées en poudre de talc.

II.2.5.1. Préparation des suspensions des spores d'actinobactéries

En vue de produire des spores, les isolats d'actinobactéries sélectionnés sont repiqués en stries serrées sur milieu ISP2 et incubés pendant 10 jours dans l'étuve à 30°C.

La préparation des suspensions des spores d'actinobactéries sélectionnés est réalisée selon la même méthode décrite précédemment (page 28). La concentration des suspensions de spores a été ajustée à environ 10^6 UFC/ml.

II.2.5.2. Formulation des biofongicide en poudre de talc

Le biofongicide a été préparé par un mélange contenant 16g de la poudre de talc et 4g de l'argile verte stérilisés par autoclavage, avec 10 ml de la suspension de spores de l'actinobactérie sélectionnée. La boue obtenue est mélangée à l'aide d'une baguette en verre pour homogénéiser la répartition des spores. Le mélange est laissé sécher pendant 48h sous hotte microbiologique à flux laminaire, les grumeaux obtenus sont ensuite pilonnés dans un mortier en porcelaine stérilisé. Le produit ainsi formulé en poudre de talc est conservé à 4°C (Zamoum *et al.*, 2017).

II.2.6. Test d'efficacité *in vivo* du biofongicide formulé

Le biofongicide formulé a été testé dans des conditions de culture *in vivo*, en sol stérilisé et en sol non stérilisé, afin d'évaluer son efficacité dans le biocontrôle de la pourriture racinaire causée par *F. culmorum* et dans la promotion de la croissance des plantules du blé dur.

II.2.6.1. Stérilisation du sol et conditionnement des pots « 200 pots »

La stérilisation du sol a été réalisée par autoclavage à 120°C pendant 20 minutes. Ensuite les pots en plastique (12cm X 8cm) ont été remplis par 250g du sol stérilisé ou non stérilisé.

II.2.6.2. Infection du sol par les spores de *Fusarium culmorum*

La suspension de spores du champignon cible a été ajoutée dans le sol stérilisé et non stérilisé une semaine avant le semis des graines du blé dur pour favoriser le développement du champignon dans le sol. Chaque pot a reçu 10 ml de la suspension de spores du champignon à une concentration d'environ 10^4 UFC/ml.

II.2.6.3. Méthode d'application des biofongicides et traitements des graines

Les graines du blé dur préalablement désinfectées ont été traitées par:

- Traitement biologique (Sérénade®) : 2g de cette poudre est dissoute dans 20ml d'eau distillé stérilisé. Cette suspension est ensuite utilisée pour bactériser les graines de blé dur.
- Traitement chimique (Dividend®) : dilution de 2ml du fongicide chimique Dividend® dans 8ml d'eau distillé. La suspension diluée est utilisée pour enrober les graines de blé dur.
- Biofongicide formulé en poudre de talc : 20 grammes de la poudre de talc a été dissoute dans 100 ml d'eau distillée stérile, puis utilisée pour bactériser les graines de blé dur.



Figure 17. Traitements des graines du blé dur par le Sérénade[®], le Dividend[®] et par le biofongicide formulé (Originale, 2019).

II.2.6.4. Traitements retenus et conduite de l'essai

Les traitements retenus dans notre expérimentation sont les suivants :

- **Témoins négatif** : des grains de blé dur désinfectés superficiellement, ont été semés dans des pots en plastique contenant du sol stérilisé et non stérilisé. L'objectif de ce traitement est de vérifier le taux de germination des grains de blé dur (variété Vitron).

- **Témoins positif** : des grains de blé dur désinfectés superficiellement, ont été semés dans des pots en plastique contenant du sol stérilisé et non stérilisé et infectés par les spores du champignon cible (*F. culmorum*). L'objectif de ce traitement est de vérifier la virulence du champignon et la sensibilité de la variété Vitron.

- **Le Sérénade[®]** : des graines du blé dur des grains de blé désinfectées superficiellement, ont été traité par le biofongicide (Sérénade[®]) et semés dans des pots en plastique contenant du sol stérilisé et non stérilisé et infectés par les spores de *F. culmorum*.

- **Le Dividend[®]** : des graines du blé dur des grains de blé désinfectées superficiellement, ont été traité par le fongicide chimique (Dividend[®]) et semés dans des pots en plastique contenant du sol stérilisé et non stérilisé et infecté par les spores de *F. culmorum*.

- **Le biofongicide formulé** : des graines du blé dur des grains de blé désinfectées superficiellement, ont été traité par le biofongicide formulé et semés dans les pots en plastique contenant du sol stérilisé et non stérilisé et infecté par les spores de champignon. L'objectif de ce traitement est de tester l'efficacité du biofongicide formulé dans le biocontrôle de *F. culmorum*.

Les graines du blé dur désinfectées et traitées ont été semées dans chaque unité expérimentale (pot en plastique) à raison de 5 graines par pot. Ces unités expérimentales sont

distribuées dans une disposition en bloc aléatoire complet à cinq répétitions (Figure 18). Les pots sont déposés dans une serre en plastique sous des conditions naturelles (30 °C/ photopériode 11h/13h). L'irrigation a été faite 4 fois par semaine par l'eau de robinet stérilisé à raison de 10 ml par pot.



Figure 18. Photographes montrant une partie du dispositif expérimental et le semer des grains de blé dur traités (Originale, 2019).

II.2.6.5. Paramètres mesurés

Après 6 semaines de culture, les plantules du blé dur ont été récupérées et lavées par l'eau de robinet pour éliminer les particules du sol. Afin de déterminer l'efficacité du biofongicide formulé dans le biocontrôle de *F. culmorum*, les paramètres mesurés sont l'incidence de la pourriture racinaire sur les plantules du blé dur, l'effet *PGPB* (longueur racinaire, longueur des tiges, poids frais et poids sec), et certains paramètres physiologiques (dosage de la proline et de la chlorophylle).

➤ Incidence de pourriture racinaire sur les plantules du blé dur

L'incidence de la pourriture racinaire sur les plantules du blé dur est exprimée en pourcentage. Elle correspond au nombre de plantules malades par rapport au nombre total des plantules semées pour chaque traitement.

➤ Effet *PGPB* des biofongicides appliqués sur les plantules du blé dur

✓ Longueur racinaire et longueur des tiges

A l'aide d'un pied à coulisse nous avons mesuré la longueur racinaire et celle des tiges des plantules du blé dur.

✓ Poids frais

Nous avons mesuré le poids frais par pesée des plantules du blé dur à l'aide d'une balance de précision.

✓ Poids sec

Le poids sec des plantules du blé dur a été obtenu par séchage des plantules à 80°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

➤ Paramètres physiologiques

✓ Dosage de la proline

La méthode de Carpiciet *al.*(2010), a été utilisée pour le dosage de la proline. Elle consiste à prendre 0.1g de matière végétale fraîche dans des tubes à essai contenant 2 ml méthanol à 40%. Le mélange est chauffé à 85°C dans un bain-marie pendant 60mn (Pour l'évaporation d'alcool). Après refroidissement, on prélève 1 ml d'extrait auquel il faut ajouter 1ml d'acide acétique(CH₃COOH) ;25mg de ninhydrine (C₆H₆O₄) et 1ml de mélange contenant : 120ml d'eau distillée, 300ml d'acide acétique et 80ml d'acide ortho phosphorique (H₃PO₄). La solution obtenue est portée à ébullition pendant 30 mn à 100°C, la solution vire au rouge, après refroidissement, 5ml de toluène sont rajoutés à la solution qui est agitée à l'aide d'un vortex. Ainsi, deux phases se séparent une phase supérieure à la couleur rouge contient la proline et une phase inférieure transparente sans proline. La phase supérieure est récupérée pour déterminer la densité optique (DO) à l'aide d'un spectrophotomètre sur une longueur d'onde de 528nm. Les valeurs obtenues sont converties en taux de proline par le biais d'une courbe étalonnage, préalablement établie à partir d'une série de solution de concentration en proline connue. Cette courbe est utilisée pour déterminer les teneurs en proline dans les feuilles des plantes (Carpiciet *al.*,2010).

✓ Dosage de la chlorophylle

Cent milligrammes de feuilles de blé dur sont broyées dans 2 ml de l'acétone à 40%, puis filtrés par du papier filtre. L'absorbance est déterminée à 649 et 665 nm par spectrophotomètre (Shahbaet *al.* 2010).

La teneur en chlorophylle totale est déterminée par la formule suivante :

$$\text{Chlorophylle totale} = 8,02 * DO_{663} + 20,20 * DO_{645}$$

Partie III :

Résultats et discussion

III. Résultats et discussion

Huit isolats d'actinobactéries ont été étudiés pour tester leur efficacité de biocontrôle de la pourriture racinaire et leur influence sur la croissance des plantules de blé dur. Les spores d'actinobactéries sélectionnés ont fait l'objet d'une formulation d'un biofongicide qui est testé, ensuite pour le biocontrôle *in vivo* de la pourriture racinaire causée par *Fusariumculmorum*.

III.1. Test d'antibiose

L'activité antagoniste *in vitro* des isolats d'actinobactéries vis-à-vis des champignons phytopathogènes et toxigènes a été étudiée par la méthode des stries croisées.

Les résultats de la mesure des zones d'inhibition entre la limite de la croissance mycélienne des champignons cibles et celle des actinobactéries testés sont présentés dans le tableau 03.

Tableau 03. Activité antifongique des souches d'actinobactéries selon la méthode de stries croisées.

Isolats	Zone d'inhibition (mm)							
	AR2	DN4	ML2	PT2	SN2	SN6	TL8	ZL2
<i>Fusariumculmorum</i>	11,30	00	12,30	28,40	29,20	27,42	25,10	32,70
<i>m</i>								
<i>F. graminearum</i>	15,20	25	09,70	25,90	29,20	11,74	29,89	29,70
<i>F. solani</i>	09,10	13	11,10	20,30	22,50	27	44,08	39,51
<i>F. oxysporum f. sp. lycopersici</i>	36,64	12	13,20	22,50	18,30	3,85	27,20	30,40
<i>F. oxysporum f. sp. radialis-lycopersici</i>	45,52	04,20	05,20	22,20	20,20	23,20	19,3	22
<i>Rhizoctoniasolani</i>	27,3	21,10	00	32,20	19,30	08,35	29,3	29,75
<i>A. flavus</i>	21,40	17,1	04,30	30,40	31,40	07,20	17,20	29,4
<i>A. alliaceous</i>	18,20	15	18,10	19,20	12,10	11,40	22,50	22,5
<i>A. parasiticus</i>	11,40	10,10	03,50	16,40	16,90	13,30	10,20	14,20

Les résultats du tableau 03 montrent que l'activité antifongique des actinobactéries testés varie d'un isolat à l'autre. Parmi les isolats étudiés, uniquement l'isolat DN4, n'a pas une activité antifongique (00 mm) contre *Fusariumculmorum*. Les zones d'inhibitions des isolats qui possèdent une activité antagoniste vis-à-vis de neuf champignons cibles sont variées entre (03,50 et 45,52mm). L'isolat *Streptomyces* sp. AR2 a montré la zone d'inhibition la plus

importante (45,52 mm) contre *F. oxysporum f. sp. radicis-lycopersici*, suivie par l'isolat *Streptomyces* sp. TL8 (44,08 mm) et *Streptomyces* sp. ZL2 (39,51 mm) contre *F. solani*. Tandis que les isolats SN2 et ZL2 ont montré une activité positive contre *F. culmorum* avec des zones d'inhibitions de 29,20 et 32,70 mm respectivement. Ainsi, l'isolat *Streptomyces* sp. SN2 est efficace contre *F. graminearum* (29,20 mm) et *Bipolaris sorokiniana* (22,50 mm) (Figure 19).

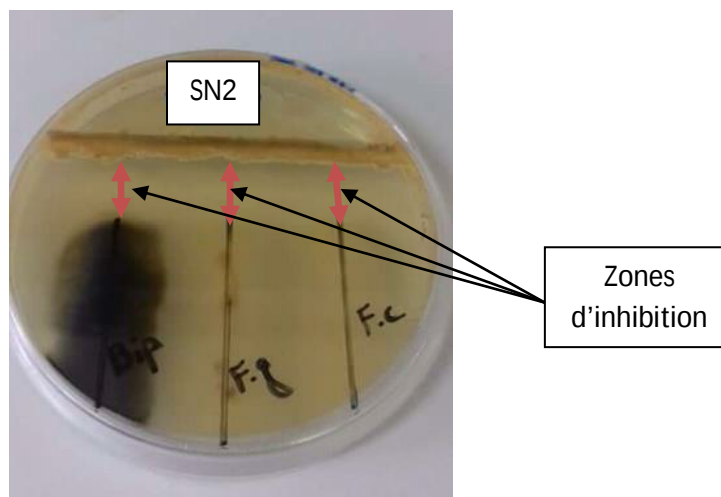


Figure 19. Photographie montrant l'activité antagoniste de l'isolat *Streptomyces* sp. SN2 vis-à-vis de trois champignons phytopathogènes cibles (Originale, 2019).

Les résultats des activités antifongiques sont confirmés par plusieurs travaux, où ils ont constaté un effet inhibiteur de certaines espèces du genre *Streptomyces* contre plusieurs champignons phytopathogènes (Ahmed *et al.*, 2008, Zitouni *et al.*, 2005).

Cette activité antifongique des actinobactéries illustrent que certains parmi ces derniers produisent des substances antifongiques qui agissent spécifiquement sur certains constituants de la paroi des champignons, comme les chitinases et les glucanases (Yekkouret *et al.*, 2012).

Les actinobactéries sont à l'origine de 70% des antibiotiques naturels connus dans le monde, principalement celles appartenant au genre *Streptomyces* considéré jusqu'à maintenant le genre le plus important (Pinet et Demain, 1988 ; da Silva Sousa *et al.*, 2008).

Ces résultats ont été rapportés par des travaux réalisés auparavant dans le même contexte effectué par Azouaou (2014), Taibaoui (2016) et Ben saad (2018).

III.2. Test du pouvoir colonisateur des racines

Après 7 jours d'incubation à 30°C, les huit souches d'actinobactéries ont été ré-isolées à partir des racines, des tiges et des collets du blé dur inoculées artificiellement. Nous avons observé la croissance des actinobactéries ré-isolées des racines des plantules de blé dur sur milieu ISP2 (Figure 20 A), ce qui s'explique par le pouvoir des isolats d'actinobactéries

endophytes à coloniser le système racinaire et à favoriser la croissance des plantules de blé dur (Figure 20 B). De plus les plantules de blé dur artificiellement inoculées n'ont pas présenté aucun symptôme pathologique. Ces résultats sont rapportés par les travaux de Teggari (2017).



Figure 20.A. Lacroissance des actinobactéries ré-isolées des racines des plantules de blé dur sur milieu ISP2.

Figure 20B. Plantule de blé dur saine inoculée artificiellement par l'actinobactérie SN2.

III.3. Formulation des biofongicide

Les isolats *Streptomyces* sp. SN2 et *Streptomyces* sp. ZL2 qui ont montré un potentiel antagoniste *in vitro*, contre les champignons phytopathogènes et toxigènes, testés et un pouvoir colonisateur des tissus des plantules de blé dur ont été sélectionnés pour effectuer des essais de formulation de leurs spores en biofongicide solide sous forme de poudre de talc (Figure 21).



Figure 21. Photographie montrant la poudre de talc d'isolat *Streptomyces* sp. SN2

La formulation de spores des isolats SN2 et ZL2 a permis d'obtenir des biofongicides homogènes. De nombreux travaux ont montré que la meilleure forme d'inclusion des spores des *Streptomyces* sp. est celle en poudre de talc (Zamoumet *al.*, 2017). Cette forme d'inclusion donne une variabilité étalée et une résistance meilleure aux conditions de conservation des spores. De plus, les spores inclus sont caractérisées par une efficacité de biocontrôle des agents phytopathogènes dans des conditions expérimentales variables (Woodward, 1985).

III.3.1. Efficacité de biocontrôle *in vivo* des biofongicides formulés

Les biofongicides formulés sous forme de poudre de talc à base des spores des deux isolats d'actinobactéries (SN2, ZL2) ont été testés dans des conditions de culture *in vivo* dans un sol stérilisé et non stérilisé pour évaluer leur efficacité dans le biocontrôle de la pourriture racinaire causée par *F. culmorum* pour la promotion de la croissance des plantules de blé dur.

Après six (6) semaines de culture, nous avons observés des symptômes de la pourriture racinaire sur les plantules de blé dur (Figure 22).



Figure 22. Pourriture racinaire observée sur les plantules de blé dur après 6 semaines de culture.

Les résultats de l'incidence de la pourriture racinaire, sont présentés par la figure 23.

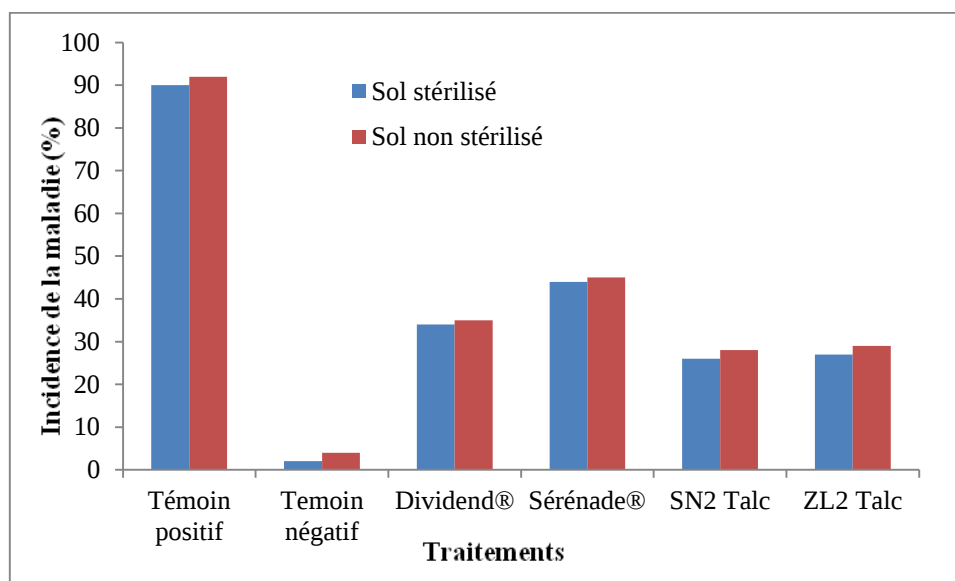


Figure 23. Histogramme représente l'incidence de la pourriture racinaire de blé dur causée par *Fusariumculmorum*.

D'après ces résultats, nous remarquons que les biofongicides formulés en poudre de talc, à base des spores des isolats *Streptomyces* sp. SN2, et *Streptomyces* sp. ZL2 ont diminué significativement ($P < 0,05$) l'incidence de la pourriture racinaire causée par *F. culmorum* dans le sol stérilisé et non stérilisé. Les résultats montrent également que l'incidence de la maladie est significativement ($P < 0,05$) plus élevée dans le témoin positif (92%), au contraire en cas de témoin négatif l'incidence de la maladie est (4%). Cependant, une différence significative a été observée entre le traitement biologique (Sérénade®) et le traitement chimique (Dividend®).

Plusieurs travaux ont rapportés que des essais de biocontrôle *in vivo* ont donné des résultats satisfaisants en utilisant des *Streptomyces* contre quelque pathogènes d'origine tellurique tel que *F. culmorum*, *F. avenaceum*, *F. oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, *Pythium debaryanum*, (Tahvonen et Avikainen, 1987 ; Mohammadi et Lahdenpera, 1992 ; Hibaret *al.*, 2007, Yekkouret *al.*, 2012 ; Goudjalet *al.*, 2014 ; Toumaiaet *al.*, 2014 ; Zamoumet *al.*, 2015). Ainsi, plusieurs biofongicide utilisés pour le biocontrôle des agents de la pourriture racinaire sont convenable des produits commerciaux à l'échelle internationale (Paulitz et Bélanger, 2001).

Dans notre étude, l'essai de biocontrôle *in vivo* montre que le biofongicide en poudre de talc à base de spores d'isolat *Streptomyces* sp. SN2 a réduit significativement l'incidence de la maladie en comparaison avec le biofongicide en poudre de talc à base de spores d'isolat *Streptomyces* sp. ZL2, Dividend® et Sérénade®. Nos résultats sont en accord avec les résultats de Zamoumet *al.*, 2017 qui ont rapporté que les graines de tomate bactérisées par le poudre de talc à base de spores de streptomyces, dans le biocontrôle de *Rhizoctonia solani*. Benssad (2018) et Bensalem (2018), ont également rapportés que les biofongicides formulés à base des

spores des *Streptomyces* sp. ont un pouvoir de biocontrôle de la pourriture racinaire du blé dur causée par *F. graminearum* et par *Bipolaris oryzae* respectivement.

III.3.2. Effet PGPB

L'application des biofongicides formulés a un effet bénéfique sur l'amélioration de la croissance des plantules de blé dur qui s'est traduit par l'élongation de la hauteur des plantules (Figure 24).

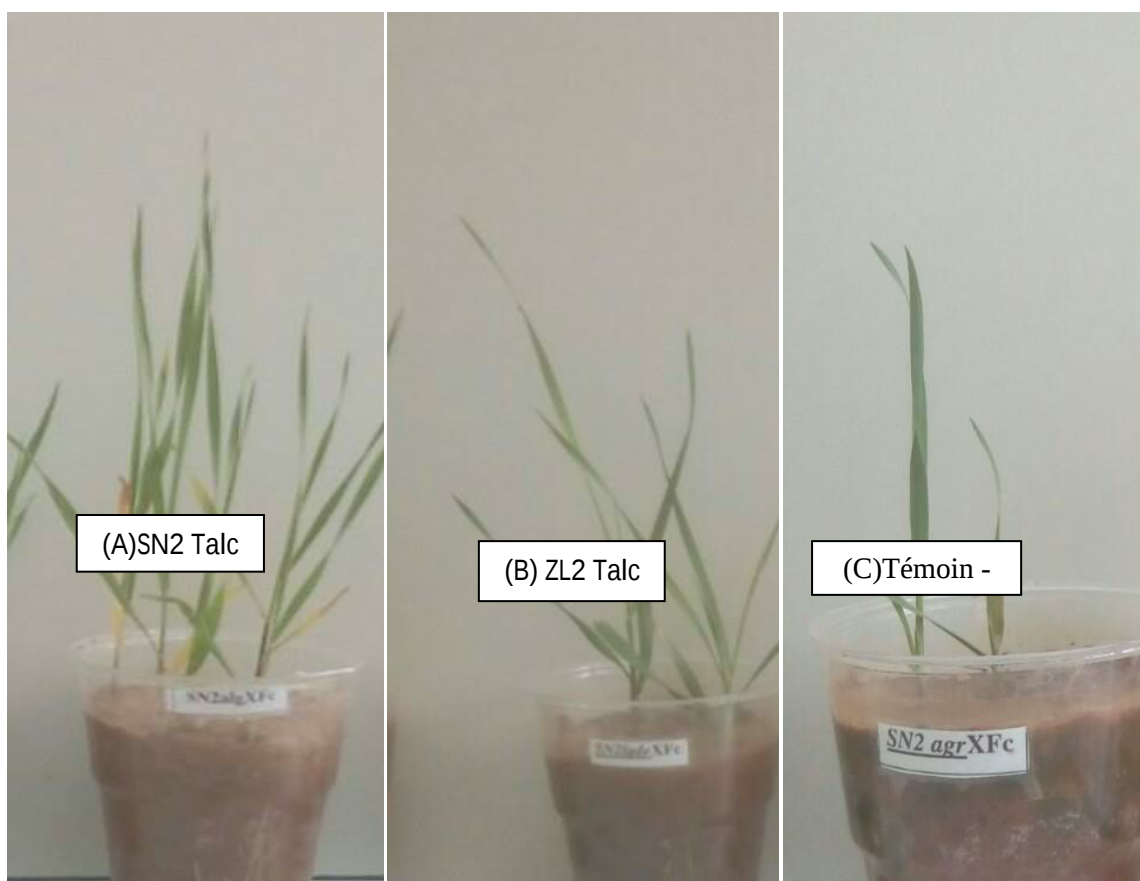


Figure 24. Promotion de la croissance des plantules du blé dur par les biofongicides formulés.

(A) : en poudre de talc à base des spores d'isolat SN2, (B) : en poudre de talc à base des spores d'isolat ZL2 et (C) : le témoin négatif (Originale, 2019).

Nous constatons que les biofongicides formulés en poudre de talc à base de spores des isolats *Streptomyces* SN2 et *Streptomyces* ZL2 ont pu améliorer la croissance des plantules de blé dur par rapport au témoin négatif (Figure 24), et ceci par l'élongation des racines, des tiges et par l'amélioration du poids frais et du poids sec (Figures 25 A, B, C et D).

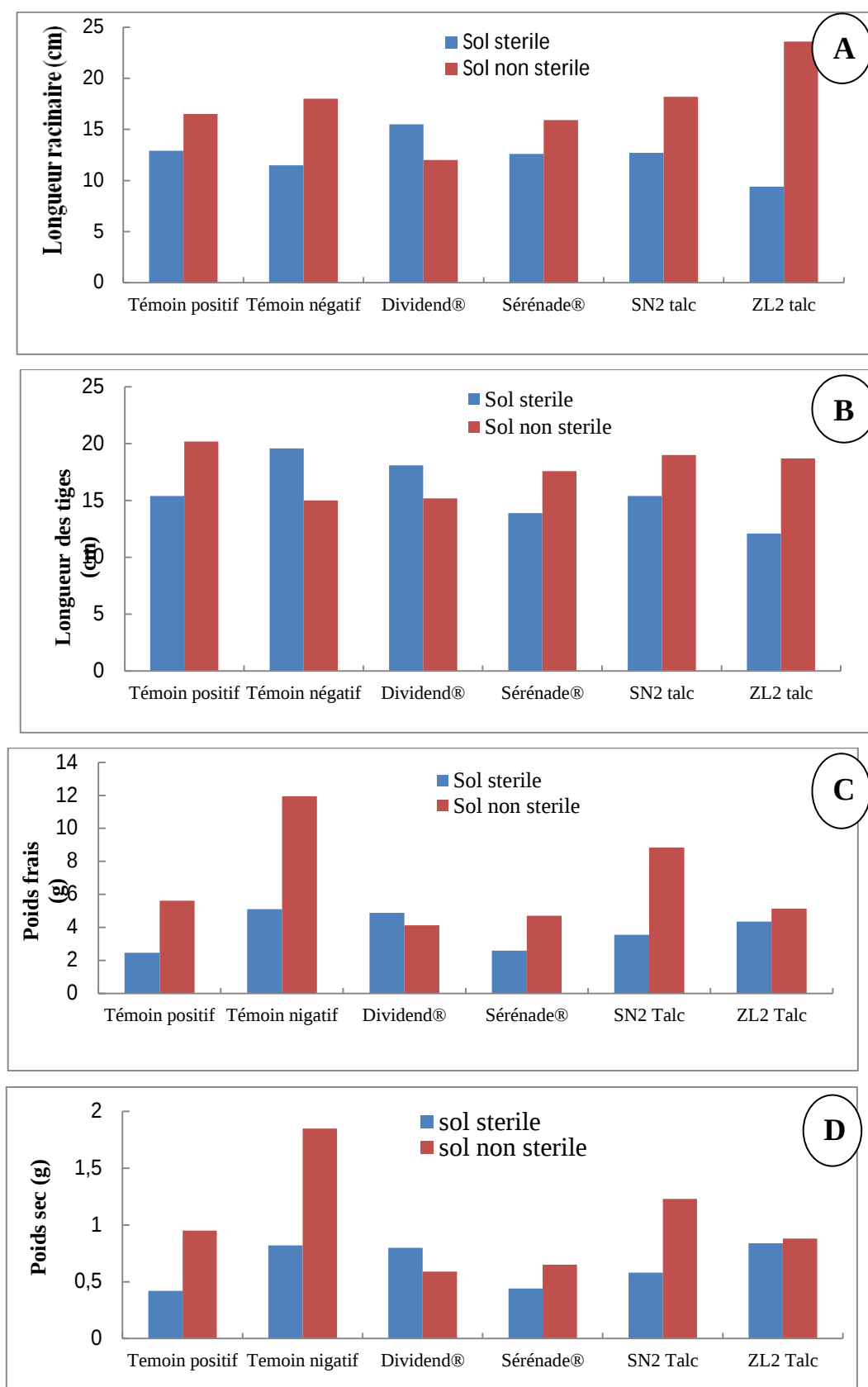


Figure 25. Effet de biofongicide formulé à base de spores de *Streptomyces* sp. SN2 et *Streptomyces* sp. ZL2 sur le promotion de la longueur racinaire (A), la longueur des tiges (B), le poids frais (C), et le poids sec (D) des plantules de blé dur cultivées en sol stérilisé et en sol non stérilisé.

Les résultats mentionnés dans les histogrammes de la figure 25 ont indiqué que le biofongicide formulé en poudre de talc des isolats SN2 et ZL2 ont amélioré la longueur racinaire, la longueur des tiges, le poids frais et le poids sec des plantules de blé dur comparativement au traitement biologique Sérénade® et au traitement chimique Dividend®. Les paramètres de croissance des plantules de blé dur ont donnés des valeurs supérieures à celles données par le témoin négatif.

Ces résultats sont semblables à ceux trouvés par Zamoumet *al.*, (2017) qui ont montré que les isolats de *Streptomyces* spp. utilisés pour la préparation d'une poudre de talc pour le biocontrôle de *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis*, agent causal de la pourriture racinaire et de collet de la tomate, stimule la croissance des plantules par l'amélioration de leur taille et de leur poids en plus de son effet de biocontrôle. Selon Adhilakshmi *et al.*, (2014), les isolats *Streptomyces* améliorent significativement la croissance et le rendement des cultures et réduisent la pourriture racinaire causée par *Macrophomina phaseolina*.

D'après Bencheikh *et al.*, 2010, l'efficacité des biofongicides en poudre de talc peut être expliquée par la diffusion rapide des spores de *Streptomyces* dans les espaces rhizosphériques.

III.3.3. Paramètres physiologiques

Afin de déterminer l'efficacité des biofongicides formulés dans le biocontrôle de *F. culmorum*, nous avons mesurés les paramètres physiologiques à savoir la teneur en chlorophylle et la teneur en proline.

✓ Teneur en chlorophylle

Après l'extraction de la chlorophylle des feuilles des plantules de blé dur, la mesure de l'absorbance par spectrophotométrie est réalisée à deux longueurs d'ondes différentes à 665 nm et à 649 nm pour calculer la concentration de la chlorophylle totale exprimée en µg/g de matière fraîche. Les différentes absorbances sont exprimées dans la figure 26.

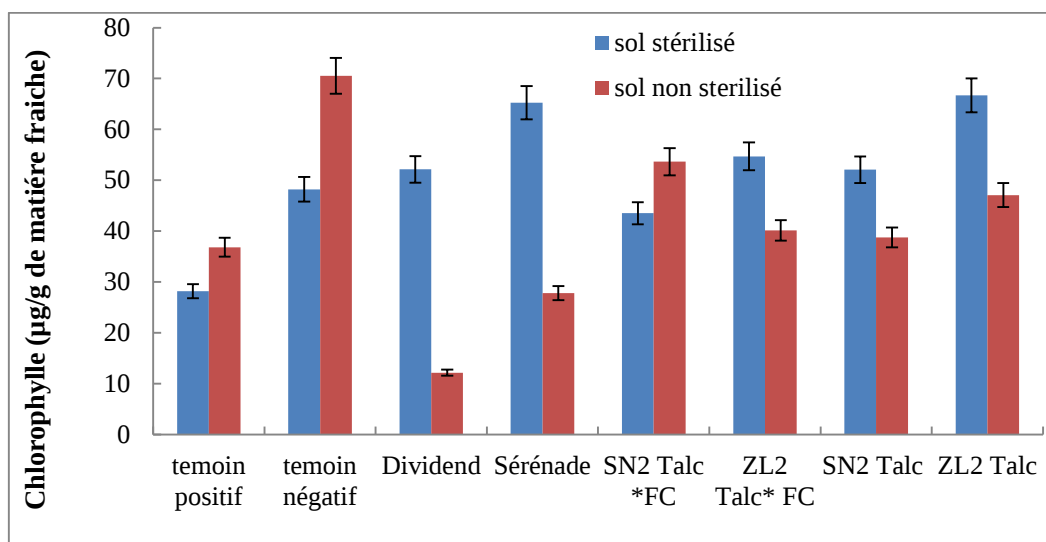


Figure 26. Effet des traitements de biofongicides formulés et les traitements retenus sur lateneur en chlorophylle des plantules de blé dur.

D'après les résultats donnés dans la figure 26, le biofongicide formulé à base de spores d'isolat ZL2 a une teneur maximale en chlorophylle ($66,68\mu\text{g/g}$), avec une valeur supérieure à celle donnée par le témoin négatif ($70,55\mu\text{g/g}$), suivie par une valeur ($65,25\mu\text{g/g}$) pour le traitement biologique Sérénade®. Cependant, aucune différence significative a été observée entre les traitements des biofongicide formulés (SN2 talc*FC, ZL2 talc*FC et SN2talc).

La teneur en pigments foliaires constitue une des principales signatures de l'état physiologique de la plante. La mesure de l'évolution de l'équipement pigmentaire dans les feuilles permet de déterminer le stade de phénologique, de différent population d'un écosystème et de révéler les situations de stress éventuelles (Marker *et al.*, 1980).

✓ Teneur en proline

Les résultats de l'évaluation de la leur teneur en proline des plantules de blé dur traitées par les biofongicides formulées à base des spores des isolats SN2 et ZL2 sont présentés dans la figure 27.

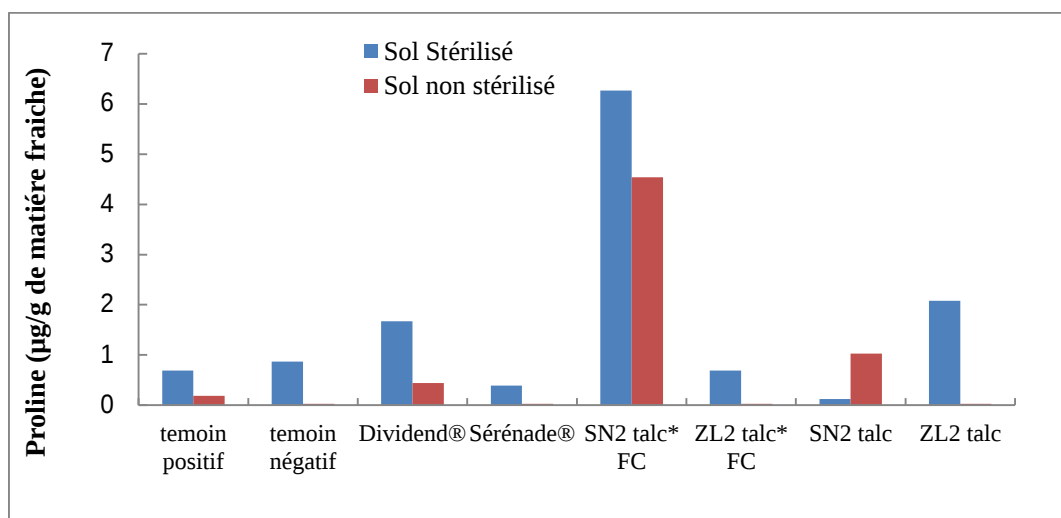


Figure 27. Effet des traitements de biofongicides formulés et les traitements retenus sur la teneur en proline ($\mu\text{g}/\text{mg}$ de matière fraîche) des plantules de blé dur.

Le traitement SN2 talc*FC montre une teneur en proline plus élevée ($6,26\mu\text{g}/\text{g}$) par rapport aux autres traitements, suivie par le traitement ZL2talc qui montre une teneur en proline ($2,07\mu\text{g}/\text{g}$) dans le sol stérilisé. Cependant, le traitement d'isolat ZL2 avec le champignon (ZL2talc*FC) a montré une teneur en proline réduite ($0,6\mu\text{g}/\text{g}$) en sol stérilisé comparativement au traitement d'isolat ZL2 sans champignon (ZL2 talc).

L'augmentation de la teneur en proline, induite par le stress, peut être le résultat de trois processus complémentaires: stimulation de sa synthèse, inhibition de son oxydation et/ou altération de la biosynthèse des protéines. D'après les résultats de la teneur en proline, nous pouvons déduire que l'accumulation de la proline est négativement corrélée avec le degré de la salinité. Par comparaison avec les travaux EL JAAFARI (1993) où il a été mentionné qu'il y a une accumulation de proline chez le blé soumises à des concentrations accentuées de salinité, nos résultats sont complètement différentes car les plantes sont traitées par des traitements à base des spores d'actinobactéries ont montré que l'augmentation des teneurs de la solution d'irrigation en sel est accompagnée parallèlement par une augmentation croissante et relativement régulière de proline (El jaafari, 1993).

L'accumulation endogène de proline chez les plantes soumises à un stress salin est utilisée comme un indicateur de l'halotolérance (Cha-Um et Kirdmanee, 2009).

Le rôle de la proline dans l'ajustement osmotique, la stabilisation des protéines et la détoxification des cellules vis-à-vis les ions toxiques est largement établi (Cha-Um et Kirdmanee, 2009).

Conclusion

Conclusion

Les pourritures racinaires sont parmi les maladies les plus importantes qui attaquent le blé dur en Algérie. Elles sont causées par plusieurs espèces du genre *Fusarium*. En plus de la perte du rendement engendrée, les qualités sanitaires des graines sont fortement dépréciées (Rastoin et Benabderrazik, 2014).

Nous avons testés l'effet de huit isolats d'actinobactéries endophytes du genre *Streptomyces* dans le biocontrôle de *Fusarium culmorum*, ainsi que sur la promotion de la croissance des plantules de blé dur.

Les tests d'activité d'antagoniste sur milieu de culture ISP2, montrent que tous les isolats inhibent la croissance mycélienne de *F. culmorum*, à l'exception de l'isolat *Streptomyces* sp. DN4. Les isolats *Streptomyces* sp. SN2 et *Streptomyces* sp. ZL2 avaient une activité d'antibiose élevée vis-à-vis ce champignon.

D'après les résultats obtenus dans le test du pouvoir colonisateur des racines, nous avons remarqué que tous les isolats ont la capacité de coloniser le système racinaire des plantules de blé dur.

Pour les résultats du taux de germination des graines de blé dur, nous avons observé que les deux isolats sélectionnés ont un effet positif sur la germination des plantules de blé dur.

Les isolats SN2 et ZL2, ont présentées une incidence de maladie sur les plantules de blé dur faible par rapport au traitement chimique *Dividend®*, traitement biologique Sérénade et au témoin positif .

Les résultats de la promotion de croissance des plantules de blé dur (longueur racinaire, longueur des tiges, le poids frais, et le poids sec), ont montré que l'enrobage des semences du blé dur, par les spores des isolats SN2 et ZL2, a amélioré la croissance des plantules, comparativement aux témoins positif et négatif, aux semences traitées par *Dividend®* et au Sérénade®.

Les deux isolats sélectionnés (SN2 et ZL2), ont améliorés les teneurs en pigments chlorophylliens et la teneur en proline des plantules de blé dur.

Les résultats obtenus dans notre travail ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation des actinobactéries dans le future pour lutter contre des espèces phytopathogènes telluriques.

Il serait intéressant d'étudier l'efficacité des isolats sélectionnés, seules ou combinées, contre d'autres agents phytopathogènes et d'étudier la viabilité des spores des isolats conservées.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Abbassenne.F, Bouzerzour. H, Hachemi. L - Ann. Agron. INA, 1998.**
Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride
- **Abdel-Hady, M. S., K. H. Fahmy, et H. M. Hassan. 2001.** Wheat genotypics and
- **Adhilakshmi M., Paranidharan V., Balachandar D., Ganesamurthy K., Velazhahan R.** Suppression of root rot of mung bean (*Vigna radiata* L.) by streptomycet sp. Is associated with induction of peroxidase and polyphenol oxidase. Arch. Phytopathol. Plant Prot. 2014; 47(5): 571-583.
- **Agrios G.N. (1988).** Plant Pathology. Academic Press, San Diego, California. 801.
- **Agrios G.N. (2005).** Plant pathology. Fifth edition. Elsevier Academic Press. San Diego, CA, 962p.
- **Ahmad, F., I. Ahmad et M. S. Khan. 2005.** Indole acetic acid production by the
- **Ahmad, F., I. Ahmad et M. S. Khan. 2008.** Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. Microbial Research., 163:p. 173-81.
- **Ahn. S Anderson. J. A. SorrellsS. M.E. Tanksley. D . 1993.** Homoeologous relationships of rice, wheat and maize chromosomes and absence of tryptophan. Turk. J. Biol. 29: 29-34. Appl. Sci. 16 (3): 68-93.
- **Bahlouli. F, Bouzerzour. H, Benmahammed. A Journal of . 2005.**
Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions
- **Bai G.H. and Shaner G. (1996).** Variation in *Fusarium culmorum* and cultivar resistance to wheat scab. *Plant Disease* 80, 975–979.
- **Barbottin. A, Lecomte. C, Bouchard. C - Crop ..., 2005.** Nitrogen remobilization during grain filling in wheat
- **Belaid Dj., 2005.** Aspects de la céréaliculture Algérienne. Offices de publications
- **Bencheikh M. and Setti B. (2010).** Characterization of *Streptomyces scabies* isolated from common scab lesions on potato tubers by morphological, biochemical and pathogenicity tests in Chlef region in western Algeria. *Sci. Technol. C.* **26**, 61-67.

- **Bendale, M. S., B. L. Chaudhari et S. B. Chinchikar. 2009.** Influence of environmental factors on siderophore production by *Streptomyces fulvissimus* ATCC 27431. *Current Trends in Biotechnology and Pharmacy*. **03**(4): 362-371.
- **Benizri, E. Baudoin, E. et Guckert, A. 2001.** Root colonization by inoculated plantgrowth rhizobacteria. *Biocontrol Science and Technology*. 11: 557-574 p.
- **Benmati M., Ykhlef N., Belbekri N. et Djekoun A.** Effect of 2, 4-dichlorophenoxyacetate on the formation of paranodules root in durum wheat(*Triticum durum* Desf.) inoculates with *Azospirillum brasilense* isolated in rhizosphere of wheat in Algeria. *Sciences & Technologie C*: 18-24/ 2012.
- **Berdy, J. 2005.** Bioactive microbial metabolites. *Journal of antibiotics*. 58: 1-26p.
- **Bonjean et Picard, 1991** les cereals à paille. Origine-histoire-économie-sélection. Ligugé ; Poitiers : Aubin imprimeur. (Evaluation de la tolérance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) par l'étude du bilan hydrique et des paramètres phéno-morpho-physiologiques).
- **Bonjean. A, Picard. E. 1990.** Les cereales a paille: Origine histoire économie selection
- **Boudemagh A. (2007).** Isolement, à partir des sols Sahariens, de bactéries actinomycétales productrices de molécules antifongiques, identification moléculaire de souches actives. Thèse de Doctorat. Université Mentouri Constantine, Algérie.
- **Boudemagh A, Oulmi L, Reghioua F, Bougha Schiche H, Zerizer H, Hamdiken A, Couble D, Mouniee A, Boulahrouf P, Boiron M, Kitouni^{ab}. 2005.** Isolement d'actinomycètes producteurs de substances bioactives à partir d'échantillons d'eau, de sol et d'écorces d'arbres du Nord-Est de l'Algérie
- **Bouizgarne B., El-Maarouf-Bouteau H., Frankart C., Reboutier D., Madiona K., Pennarun A., Monestiez M., Trouverie J., Amiar Z., Briand J., Brault M., Rona J. P., Ouhdouch Y., El Hadrami I. and Bouteau F. (2005).** Early physiological responses of *Arabidopsis thaliana* cells to fusaric acid: toxic and signaling effects. *New Phytologist* 169, 209–18.
- **Bouizgarne Brahim. 2013.** Bacteria for Plant Growth Promotion and Disease Management

- **Bozzini A. (1988).** «Origin, distribution, and production of durum wheat in the world». Dans Fabriani G. et C. Lintas (éd). Durum: Chemistry and Technology. AACC (Minnesota), États-Unis. P. 1-16.
- **Bozzini. A.1988.** Origin, distribution, and production of durum wheat in the world
- **Breton A., Theilleux J., Sanglier J.J. and Vobi G. (1989).** Organismes producteurs: biologie, taxonomie et écologie. In: Biotechnologie des antibiotiques. Larpent, J.P. and Sanglier, J.J. (Eds). Paris, Masson, pp. 33–70.
- **Brouillet, L., F. Courol, M. Favreau., (2006).**VASCAN. *The database of Canadian vascular plants. Herbar Marie-Victorin*, Institut de recherché en biologie végétale, Université de Montréal <http://data.Canadensys.net/vascan/about>.
- **Cabrera, G., A. Xiong, M. Uebel, V. K. Singh et R. K. Jayaswal. 2001.** Molecular characterization of the iron-hydroxamate uptake system in *Staphylococcus aureus*. Appl. Environ. Microbiol. **67**: 1001-1003.
- **Cao L., Qiu Z., You J., Tan H. and Zhou S. (2005).** Isolation and characterization of endophytic streptomycetes antagonists of *Fusarium* pathogen from surface-sterilized banana roots. *FEMS Microbiol. Lett.*, 247: 147- 152.
- **Caron D., 1993.** Les fusarioses. In Maladies des blés et orges (ITCF, ed.), 30-39.
- **Carpici, E., B. Clik, B. Necmettin, G. Bayram et B. Asik. 2010.** The effects of salt stress on the growth, biochemical parameter and mineral element content of some maize (*Zea mays* L.) cultivars. *Afr. J. Biotech.* **09**: 6937-6942.
- **Carver B.F. (2009).** Wheat science and trade. Ed. Wiley-Blackwell, pp. 6–160.
- **Cavelier C., Maroquin C. and Steyer S. (1992).** Les maladies des céréales. Fiches signalétiques. Centre de recherches agronomiques de Gembloux, 34 p.
- **Champeil A., Fourbet J.F., Dore T. and Rossignol L. (2004).** Influence of cropping system on *Fusarium* head blight and mycotoxin levels in winter wheat. *Crop Protection* **23**, 531–537.
- **Champion R. (1997).** Identifier les champignons transmis par les semences. Edition INRA, Paris, 398p.
- **Cha-Um, S. et C. Kirdmanee. 2009.** Effect of salt stress on proline accumulation, photosynthetic ability and growth characters in two maize cultivars. *Pak. J. Bot.* **41**(1): 87-98.

- **Cook, R-J. et Baker K-F. 1983.** The nature and practice of biological control of plant pathogens. Americ. Phytopathol. Society. 530 p.
- **Crystel H., 2014.** Le marché du blé dur. Service Agronomie Economie Environnement. Comité technique de blé dur, Ouest Océan, Février, Vouillé 79. ARVALIS. 25p.
- **Dammer K.H., Möller B., Rodemann B. and Happner D. (2011).** Detection of head blight (*Fusarium* spp.) in winter wheat by color and multispectral image analyses. *Crop Protection*, 30, 420–428.
- **De Hoog G.S., Garro J., Gene J. and Figueras M.J. (2000).** Atlas of clinical fungi. Centraal bureau voor Schimmelcultures, 2nd ed. Utrecht, The Netherlands.
- **Defago G., Haas D., Berling C., Burger U., Keel C., Voisard C., Wirthner P. et Wuthrich B. 1990.** Suppression of black root rot of tabacco and other root diseases by strains of *Pseudomonas fluorescens*: potential applications and mechanisms. In: biological control of soilborne plant pathogens (D Hornby, ed), CAB Int, p. 93-108.
- **Dill-Mackay, RK Jones - Plant disease, 2000.** The effect of previous crop residues and tillage on *Fusarium* head blight of wheat
- **Djibaoui, R. et A. Bensoltane, 2005.** Effect of iron and growth inhibitors on siderophore production by *Pseudomonas fluorescens*. *Afr. J. Biotechnol.* **04** (7):
- **El-Jaafari, R Paul, P Lepoivre, J Semal... - Cahiers ..., 1993.**
Resistance a la secheresse et reponses a l'acide abscissique: analyse d'une approche synthetique.
- **El-Tarabily K. A. (2008).** Promotion of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plant growth by rhizosphere competent 1 aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase-producing streptomycete actinomycetes. *Plant Soil*, 308: 161-174.
- **El-Tarabily K.A. and Sivasithamparam K. (2006).** Non-streptomycete actinomycetes as biocontrol agents of soil-borne fungal plant pathogens and as plant growth promoters. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 1–16.
- **Errakhi R. (2008).** Contribution d'actinomycètes (Actinobactéries) à la lutte biologique contre *Sclerotium rolfsii* et rôle de l'acide oxalique dans l'induction des mécanismes de défense. Thèse de Doctorat. Université Cadi Ayyad, Marrakech Maroc.
- **Errakhi R., Bouteau F., Lebrihi A. and Barakate M. (2007).** Evidences of biological control capacities of *Streptomyces* spp. against *Sclerotium rolfsii* responsible for

- damping-off disease in sugar beet (*Betavulgaris* L.). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23, 1503-1509.
- **Ezzahiri B., 2001.** Les maladies du blé Identification, facteurs de développement et méthodes de lutte. Transfert de technologie en Agriculture. Bulletin mensuel d'information e tde liaison du PNTTA 77, 4p.
 - **Feldman et Sears, 1981.** The Wild Gene Resources of Wheay, Vol. 244, N°. 1, January 1981; Moshe Feldman and Ernest R. Sears Scientific American Vol. 244, N°1(January 1981), pp. 102-113 Published by: Scientific American, a division of Nature America, Inc.
 - **Feldman M, Sears ER (1981).** Domestication evolution, genetics and genomics in wheat
 - **Fernandez M.R. and Jefferson, P.G. (2004).** Fungal populations in roots and crowns of common and durum wheat in Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 26, 325–334.
 - **Fernandez, C. et R. Novo. 1988.** Vida microbiana en el Suelo. Universidad de la
 - **Floyd M.H., Piper R.L. and Mertz F.P. (1987).** Sporulation of *Streptomyces roseosporus* in submerged culture. *J. Ind. Microbiol.* 2, 235-241.
 - **Fravel D.R. (2005).** Commercialization and implementation of biocontrol. *Ann. Rev. Phytopathol.* 43, 337-359.
 - **Ghorbani-Nasrbadi, R., R. Greneir, H. A. Alikhani, J. Hamed et B. Yakhchali. 2013.** Distribution of actinomycetes in different soil ecosystems and effect of media composition on extracellular phosphatase activity. *J. Plant Sci. Plant Nutr.* 13 (1):
 - **Goodfellow M. and Cross T. (1984).** Classification *In: The Biology of Actinomycetes.* Goodfellow M.M., Williams S.T. (Eds). Academic Press, London. 7-164.
 - **Goodfellow M. and Williams S.T. (1983).** Ecology of actinomycetes. *Annu. Rev. Microbiol.* 37, 189-216.
 - **Goudjal Y., Toumatia O., Sabaou N., Barakate M., Mathieu F. and Zitouni A. (2013).**Endophytic actinomycetes from spontaneous plants of Algerian Sahara: indole-3-acetic acid production and tomato plants growth promoting activity. *World J. Microb. Biot.*, 29, 1821-1829.

- **Grignac. P. 1965.** Contribution à l'étude de *Triticum durum* Desf
- **Gundliffe E. (2006).** Antibiotic production by actinomycetes: the Janus faces of regulation. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* **33**, 500-506.
Habana.p. 525.
- **Hamadache. A. 2001.** Manuel illustré des grandes cultures à l'usage des valorisateurs
- **Hamdali, H., A. Smirnov, C. Esnault, Y. Ouhdouch et M. J. Virolle. 2010.** Physiological studies and comparative analysis of rock phosphate solubilization abilities of actinomycetes originating from Moroccan phosphate mines and of
- **Hamdali, H., M. Hafidi, M. J. Virolle et Y. Ouhdouch. 2008b.** Growth promotion and protection against damping-off of wheat by two rock phosphate solubilizing actinomycetes in a P-deficient soil under greenhouse conditions. *Appl. Soil. Ecol.*
- **Harlan. JR, JMJ de Wet - Taxon, 1971.** Toward a rational classification of cultivated plants
- **Hasegawa S., Meguro A., Shimizu M., Nishimura T. and Kunoh H. (2006).**Endophytic actinomycetes and their interactions with host plants. *Actinomycetologica*, 20, 72–81.
- **Hayakawa M., Yoshida Y. and Iimura Y. (2004).** Selective isolation of bioactive soil actinomycetes belonging to the *Streptomyces Violaceusniger* phenotypic cluster. *J. Appl. Microbiol.* **96**, 973-981.
- **Hazmoune. T. 1994.** Contribution à la caractérisation de l'appareil racinaire de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.).
- **Henry, Y; et B uyser, J. (2000).** L'origine du blé. Pour le Science, Hors série. 2 : 60-62. Appréciation de la variabilité génétique des blés durs et des blés apparentés par les marqueurs biochimiques.
- **Hopwood D.A., Lydiate D.J., Malpartida F. and Wright H.M. (1985).** Conjugative sex plasmids of *Streptomyces*. **30**, 615-634.
- **Index phytosanitaires, 2015,** index des produits sanitaires à usage agricole, juillet 2015, Alger.
- **Jenkinson P. and Parry D.W. (1994).** Splash dispersal of conidia of *Fusarium culmorum* and *Fusarium avenaceum*. *Mycological Research*, 98, 506–510.

- **JF Leslie, BA Summerell, S Bullock – 2006.** The *Fusarium* laboratory manual
 - **Jiang Y., Li W. J., Xu P., Tang S. K. and Xu L. H. (2005).** Study on diversity of Actinomycetes salt and alkaline environments. *Wei Sheng Wu Xue Bae.*, 46, 191-195.
 - **Jijakly M.H. (2003).** La lutte biologique en phytopathologie, *In : Phytopathologie.* Lepoivre P. (Eds). De Boeck, Bruxelles.
 - **Jones R.K. (2000).** Assessments of *Fusarium* head blight of wheat and barley in response to fungicide treatment. *Plant Disease*, 84, 1021–1030.
 - **Kalakoutskii L.V. and Agre N.S. (1976).** Comparative aspects of development and differentiation in actinomycetes. *Bacteriol. Rev.* **40 (2)**, 469-524.
 - **Kaneko M., Itoh H., Inukai Y., Sakamoto T., Ueguchi-Tanaka M., Ashikari M. and Matsuoka M. (2003).** Where do gibberellin biosynthesis and gibberellin signaling occur in rice plants. *Plant J.*, 35, 104-115.
 - **Kang Z. and Buchenauer H. (2000).** Ultrastructural and immunocytochemical investigation of pathogendevlopment and host responses in resistant and susceptible wheat spikes infected by *Fusarium culmorum*. *Physiological And Molecular Plant Pathology* 57, 255–268.
 - **Kempe J. and Sequeira L. (1983).** Biological control of bacterial wilt of potatoes: Attempts to induce resistance by treating tubes with bacteria. *Plant Dis.* **67**, 499-501.
 - **Kennedy A.C. (1999).** Bacterial diversity in agroecosystems agriculture. *Ecosys. Environ.* **74**, 65-76.
- la recherche agronomique de Tunisie (Inrat). Univ. Elmanar. Tunisie. ([http:// www. John-libbeyeurotext. Fr/fr/revues/agro_biotech/sec/edocs/00/04/11/2^E/telecharger.md](http://www.John-libbeyeurotext.Fr/fr/revues/agro_biotech/sec/edocs/00/04/11/2^E/telecharger.md)).
- **Lacey J. (1997).** Actinomycetes in composts. *Ann. Agr. Env. Med.* **4**, 113-121.
 - **Laegreid M., Bockman O.C. and Kaarstad O. (1999).** Agriculture and fertilizers. CABI Publishing, New York.
 - **Larpent J-P. and Larpent-Gourgaud M. (1985).** Eléments de Microbiologie. Hermann. Paris. 264.
 - **Lechevalier M.P. and Lechevalier H. (1970).** Chemical composition as a criterion in the classification of aerobic actinomycetes. *Int. J. Syst. Bacteriol.* **20**, 435-443.

- **Lechevalier M.P. and Lechevalier H. (1985).** Biology of actinomycetes not belonging to genus *Streptomyces* In: Biology of industrial microorganisms. The Benjamin Cummings Publishing Company, Inc. 315-316.
- **Leslie J.F., Summerell B.A. (2006).** The *Fusarium* laboratory manual. Blackwell Professional, Ames, Iowa, USA.
- **Lewis J.A., Fravel D.R., Lumsden R.D. and Shasha B.S. (1995).** Application of biocontrol fungi in granular formulations of pregelatinized starch-flour to control damping-off diseases caused by *Rhizoctonia solani*. *Biological control*, 5, 397–404.
- **Loqman S., Barka E.A., Clement C. and Ouhdouch Y. (2009).** Antagonistic actinomycetes from Moroccan soil to control the grapevine gray mold. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25, 81–91.
- **M McMullen, R Jones, D Gallenberg - Plant disease, 1997.** Scab of wheat and barley: a re-emerging disease of devastating impact
- **Macagnan D. 2008.** Romeiro, !!!!!RDA. Pomella AMV. DeSouza, JT. Production of lytic enzymes and siderophores, and inhibition of germination of basidiospores of *Moniliophthora* (ex *Crinipellis*) perniciosaby phylloplan actinomycetes. *Boil Control*. 309p.
- **MADR., (2011).** Observation National des filières Agricoles et Agroalimentaires (ONFAA). Bilan de la campagne céréalière 2010/2011.
- **Mahadevan B. and Crawford D.L. (1997).** Properties of the chitinase of the antifungal biocontrol agent *Streptomyces lydicus* WYEC108. *Enz. Microbil. Tech.* **20**, 489-493.
- **Mariat F. and Sebald M. (1990).** Actinomycètes. In: Bactériologie Médicale. Le Minor L. et Véron M. (Eds), 2ème édition, Flammarion. Paris. 935-949.
- **Marker A. F. H., Nush E. A., Rai H. and Riemaan B., (1980).** The measurement of photosynthetic pigments in freshwater and standardization of methods : conclusions and recommendations. (Univ. Copenhagen, Freshwater Biological Laboratory, 51 Helsingorsgade, DK - 3400 Hillerod). *Arch. Hydrobiol. Beilh. (Ergehn. Limnol.)*, 14, 91-106, bibl. (63 ref).
- **Mascher F., Michel V. et Browne RA., 2005.** Sélection de variétés de blé et de triticales résistantes à la fusariose sur épi. *Revue suisse Agric.* 189-194.
- **Mazzola M. (2002).** Mechanisms of natural soil suppressiveness to soilborne diseases. *Antonie van Leeuw.* **81**, 557–564.

- **McKenna F., El-Tarabili K.A., Petrie S. and Dell B. (2002).** Application of actinomycetes to soil to ameliorate water repellency. *Lett. Appl. Microbiol.* **35**, 107-112.
- **Meyer J. (1994).** The Genus *Nocardiopsis* Meyer 1976. In: Bergey's manual of determinative bacteriology, 9ème Ed. Holt J. G., Krieg N. R., Sneath P. H. A., Staley J. T. and Williams S. T. (Eds). Baltimore, Williams & Wilkins. 2562-2568.
- **Mincer T.J., Jensen P.R., Kauffman C.A. and Fenical W. (2002).** Widespread and persistent population of a major new marine actinomycetes taxon in ocean sediments. *Appl. Env. Microbiol.* **68(10)**, 5005-5011.
- **Monneveux. P, E Deléens, B Teulat, - Journal of agronomy ..., 2002.**
Association between yield and carbon isotope discrimination value in different organs of durum wheat under drought
- **MOUELLEF. A. – 2010.** Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique.
- **Muller G., Matzanke B. F. et Reymoud. K. N. 194.** Iron transport in *Streptomyces pilosus* mediated by ferrichrome siderophores, rhodotorulic acid, and enantiorhodotorulic acid. *J. Bacteriol.* **160**: p. 313-318.
- **Nadjem kamel 2012.** CONTRIBUTION A L'ETUDE DES EFFETS DU SEMIS DIRECT SUR L'EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU ET LE COMPORTEMENT VARIETAL DE LA CULTURE
- **Nicholson P., Simpson D.R., Wilson A.H., Chandler E., Thomsett M. (2004).** Detection and differentiation of trichothecene and enniatinproducing *Fusarium* species on small-grain cereals. *Eur. J. Plant Pathol.*, **110**, 503–514.
- **Okami Y. and Hotta K. (1988).** Search and discovery of new antibiotics. In: *Actinomycetes in biotechnology*. Goodfellow M.G., Williams S.T. and Modarski M. (Eds). Academic Press London, New-York. 33-68.
- **Parry D.W., Jenkinson P. and McLeod L. (1995).** *Fusarium* ear blight (scab). In small grain cereals-a review. *Plant Pathology*, **44**, 207–238.
- **Paulitz T.C. and Belanger R.R. (2001).** Biological control in green house system. *Annual Review of Phytopathology*, **39**, 103–133.

- **PérezMiranda S., Cabirol N., George-Téllez L., Zamudio-Rivera L. S. et Fernàndes E. J. 2007.** O-CAS, a fast and universal method for siderophore detection. *J. Microbiol. Methods.* 70: p. 127-131.
- **Prapagdee B., Kuekulvong C. and Mongkolsuk S. (2008).** Antifungal potential of extracellular metabolite produces by *Streptomyces hygroscopicus* against phytopathogenic fungi. *Int. J. Biol. Sci.* 4, 330-337.
- **Pujic, N. & Normand, P. (2009).** La symbiose racinaire entre la bacteria Frankia et les plantes actinorhiziennes. *Biofutur* 28 (298) : 26-29.
- **Rastoin, Jean-Louis Benabderrazik, Hassan. 2014.** Céréales et oléoprotéagineux au Maghreb : pour un co-développement de filières territorialisées
- **Reis E.M., Carmona M.A. (2013)** Chapter 10: Integrated Disease Management of *Fusarium* Head Blight In: Alconada Magliano, T.M. and Chulze, S.N. (eds.), *Fusarium Head Blight in Latin America*. Springer Science+Business Media Dordrecht, pp 159-173.
- **Reponen T.A., Gazonko S.V., Grinshpun S.A., Willeke K. and Cole E.C. (1998).** Characteristics of airborne actinomycete spores. *Appl. Environ. Microbiol.* 64(10), 3807-3812.
- **Sabaou N., Boudjella H., Bennadji A., Mostefaoui A., Zitouni A., Lamari L. et al. (1998).** Les sols du Sahara algérien, source d'actinomycètes rares producteurs d'antibiotiques. *Sécheresse.* 9, 147-153.
- **Sakamura. T, Shokubutsugaku Zasshi, 1918.** Kurze Mitteilung über die Chromosomenzahlen und die Verwandtschaftsverhältnisse der *Triticum*-Arten
- **Sarah, D., Ellis, S.D, Boehm, M.J. (2008).** Plants Get Sick Too. An introduction to.
- **Sardi P., Saracchi M., Petrolini B., Borgonovi G.E. and Merli S. (1992).** Isolation of endophytic *Streptomyces* strains from surface-sterilized roots. *Appl. Env. Microbiol.* 58(8), 2691-2693.
- **Sayoud R., Ezzahiri B. and Bouznad Z. (1999).** Les maladies des céréales et des légumineuses alimentaires au Maghreb. ITGC. Alger, 64 p.
- **Schlüter K., Kropf U. and Karlovsky P. (2006).** An examination of systemic infections of *Fusarium culmorum* in Schleswig-Holstein. *Gesunde Pflanzen,* 58, 107.
- **Schroeder H.W. and Christensen J.J. (1963).** Factors affecting resistance of wheat scab caused by *Giberella zeae*. *Phytopathology,* 53, 831–838.

- **Shi Y., Lou K. and Li C. (2009).** Promotion of plant growth by phytohormone-producing endophytic microbes of sugar beet. *Biol. Fert. Soils*, 45, 645-653.
 - **Singh P.P., Shin Y.C., Park C.S. and Chung Y.R. (1999).** Biological control of *Fusarium* wilt of cucumber by chitinolytic bacteria. *Phytopathol.* **89**(1), 92-99.
 - **Slama A., Ben Salem M., Ben Naceur M. & Zid E.D. 2005.** Les céréales en Tunisie: production, effet de la sécheresse et mécanismes de la résistance. Institut national de
 - **Soltner D., 1998.** Les grandes productions végétales : céréales, plantes sarclées, prairies. Sainte-Gemme-sur-Loire, Sciences et Techniques Agricoles.
- somaclonal variation in relation with in vitro selection for salt tolerance. Egypt J.
- **Source** (<http://faostat3.fao.org>).
 - **Strange RN. & Smith H., 1971.** A fungal growth stimulant in anthers which predisposes wheat to attack by *Fusarium graminearum*. *Physiological Plant Pathology* 1. 141-150.
- Streptomyces lividans*. Appl. Soil. Ecol. **44**: 24-31.
- **Tahvonen R.T. and Avikainen H. (1987).** The biological control of seedborne *Alternaria brassicicola* of cruciferous plants with a powdery preparation of *Streptomyces* sp. *J. Agr. Sci. Finland.* **59**, 199-208.
 - **Takahashi Y. and Omura S. (2003).** Isolation of new actinomycete strains for the screening of new bioactive compounds. *J. Appl. Microbiol.* **49**, 141-154.
 - **Thumar J. T. et Singh. S. P. 2007.** Secretion of an alkaline protease from a salttolerant and alkaliphilic *Streptomyces clavuligerus* Strain MIT-1. *Braz. J. Microbiol.* 38: p. 766-772.
 - **Tokala R. K., Strap J. L., Jung C.M., Crawford D.L., Salove M.H., Deobald L.A., Bailey J.F. and Morra M.J. (2002).** Novel plant-microbe rhizosphere interaction involving *Streptomyces lydicus* WYEC108 and the pea plant (*Pisum sativum*). *Appl. Environ. Microbiol.*, 68, 2161-2171.
 - **Toumatia, A Yekkour, Y Goudjal, 2015.** Biocontrol of *Rhizoctonia solani* damping-off and promotion of tomato plant growth by endophytic actinomycetes isolated from native plants of Algerian Sahara
 - **Trail F., 2009.** For blighted waves of grain : *Fusarium graminearum* in the postgenomics era. *Plant Physiology*, 149(1). 103-110.
- Universitaires. 203p.

- **Van den Broek D., Chin-A-Woeng T.F.C., Eijkemans K., Mulders,I.H.M., Bloemberg G.V., and Lugtenberg B.J.J., (2003).** Biocontrol traits of *Pseudomonas* spp. are regulated by phase variation. *Mol. Plant–Microbe Interact*, 16: 1003–1012.
- **Wadley G., Martin A. 1993.** The Origins of Agriculture,A Biological Perspective and New Hypothesis.Australian Biologist 6: 96-105.
- **Wagacha J.M. and Muthomi J.W. (2007).** *Fusarium culmorum*: infection process, mechanisms of mycotoxin production and their role in pathogenesis in wheat. *Crop Protection*, 26, 877–885.
- **Yekkour .A, Sabaou. N, Zitouni. A, 2012.** Characterization and antagonistic properties of *Streptomyces* strains isolated from Saharan soils, and evaluation of their ability to control seedling blight of barley caused by *Fusarium culmorum*.
- **Yuan W.M. and Crawford D.L. (1995).** Characterization of *Streptomyces lydicus* WYEC 108 as a potential biocontrol agent against fungal root and seed rots. *Appl. Environ. Microb.* **61**, 3119-3128.
- **Yuen G. Y., et Schoneweis S. D., (2007).** Strategies for managing *Fusarium* head blight.
- **Zamoum M., Goudjal Y., Sabaou N., Mathieu F., Zitouni A., 2017.** Development of formulations based on streptomyces rochei strain PTL2 spores for biocontrol of Rhizoctonia solani damping-off of tomato seedlings.BIOCONTROL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2017 <https://doi.org/10.1080/09583157.2017.1334257>.
- **Zamoum. M, Goudjal. Y, Sabaou. N, 2015.** Potential of endophytic *Streptomyces* spp. for biocontrol of *Fusarium* root rot disease and growth promotion of tomato seedlings
- **Zielinski. J, WD Spencer, RH Barrett - Journal of Mammalogy, 1983 .** Relationship between food habits and activity patterns of pine martens
- **Zillinsky, F.J., (1983).** Maladies communes des céréales à paille. Guide d'identification.
- **Zitouni A., Boudjella H., Lamari L., Badji B., Mathieu F., Lebrihi A., Sabaou N., (2005).** *Nocardioopsis* and *Saccharothrix* genera in Saharan soils in Algeria: Isolation,

biological activities and partial characterization of antibiotics. Research in Microbiology, 156: 984-993.

عنوان المذكرة : اختبار صباغة مبيدات الفطريات الحيوية باستعمال عزلات أكتينوبكتيريا التكافلية.

اللقب: بن عليّة

الإسم: نوال

المؤطر: زعموم ميادة

ملخص: الهدف من هذا العمل هو تقييم فاعلية ثماني عزلات من الأكتينوبكتيريا من جنس *Streptomyces* في مكافحة البيولوجية' للمرض تعفن الجذر في قمح الصلب الذي يسببه فطر *Fusarium culmorum*. تم اختبار جميع العزلات و ذلك لتقييم نشاطها المضاد للفطريات و قدرتها على استعمار الجذور ' وكذلك لتقييم تأثير *PGPB* في تعزيز نمو نبات القمح الصلب مقارنة مع مبيدات الفطريات الكيميائية (*Dividend®*) والمبيدات الحيوية (*Sérénade®*). أغلبية العزلات تمنع نمو الفطر *F. culmorum* ، وجميع العزلات لديها القدرة على استعمار النظام الجذري لشتلات القمح الصلب. تم العثور على عزلي SN2 و ZL2 المحفزة في تعزيز نمو شتلات القمح الصلب، وأظهرت أفضل نتائج مكافحة الحيوية و انخفاض في نسبة حدوث المرض، وتحسين المحتويات في أصباغ الكلوروفيل ومحتوى البرولين لشتلات القمح الصلب. تظهر نتائج هذا العمل أن المبيدات الحيوية المستندة إلى الأبواغ للبكتيريا *Streptomyces* sp. SN2 و *Streptomyces* sp. ZL2 التي يتم صياغتها في بوردرة تلك ، لها كفاءة في التحكم البيولوجي وتأثير *PGPB*، مما يجعل من الممكن اقتراح استخدامها في مكافحة البيولوجية.

الكلمات المفتاحية: الاكتينوبكتيريا' المراقبة البيولوجية' *Streptomyces* ' التعفن الجذري' القمح الصلب' *PGPB* ' *Fusarium culmorum*.

Memory title: Biofungicide formulation test based on symbiotic actinobacterial spores.

Name: Benalia

First name : Nawal

Directed by : Zamoum Miyada

Abstract: The objective of this work is to evaluate the efficacy of eight isolates of actinobacteria of the genus *Streptomyces* in the biological control of the phytopathogenic fungus *Fusarium culmorum*, which causes root rot in durum wheat. All of the actinobacteria isolates were tested *in vivo* for their anti fungal activity and root-colonizing power, as well as for evaluating the *PGPB* effect in promoting durum wheat plant growth and physiological parameters, compared with with chemical fungicide (*Dividend®*) and bio fungicide (*Sérénade®*).

The majority of isolates inhibit mycelial growth of *F. culmorum*, and all isolates have the ability to colonize the root system of durum wheat seedlings.

The SN2 and ZL2 isolates were found to be very promising in promoting the growth of durum wheat seedlings, and showed the best biocontrol results of fouthmouthed and a decrease in the incidence of the disease, and improved the contents in chlorophyll pigments and the proline content of durum wheat seedlings.

The results of this work show that spore-based biofungicides of *Streptomyces* sp. SN2 and *Streptomyces* sp. ZL2 which are formulated in talcum powder, have biocontrol efficiency and the *PGPB* effect, which makes it possible to suggest their use in biological control.

Keywords: Actinobacteria, biocontrol, *Sterptomyces*, root rot, durum wheat, *PGPB*, *Fusarium culmorum*.

Titre du mémoire : Essai de formulation de biofungicide à base des spores d'actinobactéries symbiotiques.

Nom: Benalia

Prénom: Nawal

Encadreur: Zamoum Miyada

Résumé : Ce travail a pour objectif d'évaluer l'efficacité de huit isolats d'actinobactéries du genre *Streptomyces*, dans la lutte biologique contre le champignon phytopathogène *Fusarium culmorum* qui cause la pourriture racinaire de blé dur. L'ensemble des isolats d'actinobactéries ont été testées *in vivo* pour leur activité antifongique et leur pouvoir colonisateur des racines. Les huit isolats ont été testés pour évaluer l'effet *PGPB* dans la promotion de la croissance des plantules de blé dur et les paramètres physiologiques, comparativement au fongicide chimique (*Dividend®*) et biofungicide (*Sérénade®*).

La majorité des isolats ont inhibé la croissance mycélienne de *F. culmorum*, et tous les isolats ont la capacité de coloniser le système racinaire des plantules de blé dur.

Les isolats SN2 et ZL2 se sont avérées très prometteuses dans la promotion de la croissance des plantules de blé dur, et ont montré les meilleurs résultats de biocontrôle de *F. culmorum* et une diminution de l'incidence de la maladie. Ils ont améliorés les teneurs en pigments chlorophylliens et la teneur en proline des plantules de blé dur.

Les résultats de ce travail montrent que les biofungicides à base des spores des isolats *Streptomyces* sp. SN2 et *Streptomyces* sp. ZL2 qui sont formulées en poudre de talc, ont une efficacité de biocontrôle et l'effet *PGPB* ce qui permet de suggérer leur utilisation en lutte biologique.

Mots clé : Actinobactérie, biocontrôle, *Streptomyces*, pourriture racinaire, blé dur, *PGPB*, *Fusarium culmorum*.