

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

**Faculté des Sciences Agronomiques et Vétérinaires**

Département d'Agronomie

# **MEMOIRE DE MAGISTER**

Option : Amélioration des productions végétales

ADAPTATION RHIZOSPHERIQUE DES *Pseudomonas* spp.  
FLUORESCENTS ET LEURS EFFETS BENEFIQUES SUR LA  
BIOSTIMULATION DE LA CROISSANCE ET DE LA  
PRODUCTION DE LA TOMATE ET DE LA POMME DE  
TERRE

Par

**ABED Amina**

Devant un jury composé de

M. BENMOUSSA	Professeur, U. de Blida	Président
S A. BOUTAHRAOUI	Chargé de Cours, U. de Blida	Examineur
A. BOUTEKRABT	Professeur, U. de Blida	Promoteur
M. BENCHABANE	Maître de conférences, U. de Blida	Co-promoteur

Blida, Juin 2008



## RESUME

L'objectif principal de notre travail est de mettre en évidence l'effet de biostimulation de cinq souches de *Pseudomonas fluorescens* : CHAO, C7R12, P64, S20 et CK4 sur différents paramètres de croissance, de développement et de production pendant tout le cycle de deux cultures : tomate et pomme de terre. L'expérimentation a été réalisée dans une station expérimentale de l'institut technique des cultures maraîchères et industrielles (ITCMI) Staoueli, Alger, dans des conditions pratiques non contrôlées. La culture de tomate a été conduite sous serre, les cinq souches bactériennes ont été appliquées sur deux variétés : Nedjma et Agora. Pour la pomme de terre, la culture a été réalisée en plein champ où une seule variété a été utilisée (Spunta) en deux essais différents : le premier consistait à appliquer les cinq souches en présence d'une fertilisation minérale et le deuxième en absence totale de fertilisation minérale tout au long du cycle de la culture. Des effets de phytostimulation notables ont été obtenus par le calcul des gains induits par les cinq souches bactériennes par rapport aux témoins non bactérisés, ces gains variaient de 0,33 à 148,86 % chez la culture de tomate et de 0,16 à 50 % chez la culture de pomme de terre, ils ont été enregistrés particulièrement aux stades juvéniles des plantules. Les valeurs des gains étaient différentes suivant les souches bactériennes, l'espèce végétale et les paramètres étudiés. Pour la culture de tomate, la variété Nedjma semble plus stimulée par la bactérisation que la variété Agora, de meilleurs résultats ont été notés également en présence d'éléments minéraux fertilisants pour la culture de pomme de terre. Enfin l'étude de la dynamique des populations bactériennes a montré une forte colonisation rhizosphérique des cinq souches inoculées. Ces résultats montrent les possibilités de l'utilisation d'inoculum à base de bactéries PGPRs (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) en les intégrant dans une gestion agricole, en combinaison avec une fertilisation minérale adéquate pour de meilleurs rendements.

Mots clés : PGPR, *Pseudomonas fluorescens*, phytostimulation, souches bactériennes, culture de tomate, culture de pomme de terre, fertilisation minérale

## ABSTRACT

The principal objective of our work is to make in evidence the effect of biostimulation of five strains of *Pseudomonas fluorescens* (CHAO, C7R12, P64, S20 and CK4) on growth, development and production parameters during all the cycle of the two cultures: tomatoes and potatoes plants. Our experiments has been realised in an experimental station (ITCMI: Institut technique des cultures maraîchères et industrielles, Staoueli, Alger), in practical cultural conditions. The cultivation of tomatoes plant has been conduced under green house, the five bacterial strains have been applicated on two cultivars: Nedjma and Agora. For the potatoes plant, the cultivation has been realised in full filed with one cultivar (Spunta) in two different trials: the first consisted to apply the bacteria in the presence of mineral fertilisation and the second in absence of mineral fertilisation during all the cycle. Significant phytostimulation effects have been obtained after calculation of the gains induced by the five bacterial strains in comparaison with plants no bacterised (check samples). These gains varied from 0,33 to 148,86 % in the culture of tomatoe and from 0,16 and 50 % in the culture of potatoe. They have been registrated, particularly in the juvenile stages of plants. The positif effects have been different following the strains bacteria, the vegetal kind and the studied parameters. For the culture of tomatoe, Nedjma cultivar seems more stimulated by the bactérisation than the Agora cultivar. Best results have been showed as well as in the presence of mineral fertilizing elements for the culture of potatoe. At last the study of the dynamic of the bacterial populations has shown a high rhizospheric colonisation of the five inoculated strains. These results show the possibilities of the utilization of bacterial inoculums, in formulated with PGPR bacteria (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), by integrating them in agricol gestion in combinaison with an adequate mineral fertilization for better yielding.

**Key words:** *Pseudomonas fluorescens*, PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), phytostimulation, bacterial strains, culture of tomatoe, culture of potatoe, mineral fertilization.

## ملخص

الهدف الرئيسي من دراستنا هو إبراز تأثير التحفيز الايجابي لخمسة سلالات لبكتريا *fluorescens Pseudomonas* (CK4 , S20 , P64 , C7R12 , CHAO) وذلك بتحفيز عوامل النمو و التطور و إنتاج الطماطم و البطاطس . أجريت الدراسة التجريبية بالمحطة التجريبية للمعهد التقني للنباتات البقولية و النباتات الصناعية (Institut technique des cultures maraichères et industrielles ITCMI Staouali ,Alger) في ظروف تطبيقية غير مراقبة . زراعة الطماطم أجريت تحت بيوت بلاستيكية باستعمال السلالات البكتيرية الخمس للأصناف النباتية: *Nedjma* و *Agora*. بالنسبة للبطاطس أجريت الزراعة في حقل باستعمال صنف واحد *Spunta* في تجربتين مستقلتين، الأولى في حالة وجود مخصبات معدنية، الثانية في غياب التخصيب.

مقارنة نمو النباتات المعالجة بالبكتريا مع نظيرتها الغير معالجة (الشاهد) أظهرت لنا مفعول ايجابي متمثلا في زيادة ملحوظة في النمو النباتي متراوح بين 0.33 و 148.86 % لدى نبات الطماطم و من 0.16 إلى 50 % لدى نبات البطاطس. الزيادات في تحفيز النمو كانت بارزة جدا في المراحل الأولى للنمو أي المراحل الفتية . الزيادات المسجلة متغيرة حسب السلالات البكتيرية الخمس و كذا نوع النبات و حسب المعايير المدروسة مثل : النمو ، الإنتاج ، نسبة البروتينات في النبات ، نسبة الفوسفور والبوتاسيوم على مستوى المجموع الجذري . فيما يخص نبات الطماطم ، التحفيز النباتي لدى الصنف *Nedjma* كان أحسن من الصنف *Agora* . نتائج جيدة كانت ملاحظة في حالة وجود العناصر المعدنية المخصبة عند نبات البطاطس . في الجزء الأخير من دراستنا قمنا بتعداد المستوطنات البكتيرية في التربة اللاصقة بالمجموع الجذري و لاحظنا مستويات عميد جد مرتفعة، مما يدل على تأقلم هذه البكتريا مع الأصناف النباتية المدروسة. نتائج عملنا بإمكانها أن تكون مؤشر و دلالة لاستعمالها في الجانب التطبيقي ، و ذلك بمنظور الفلاحة البيولوجية من أجل استغلال الجوانب الايجابية لهذه الأحياء الدقيقة ( Plant growth promoting : PGPR rhizobacteria ) وإدماجها في الأعمال الفلاحية الأساسية .

الكلمات المفتاحية : PGPR ، *Pseudomonas fluorescens* ، التحفيز النباتي ، السلالات البكتيرية ، نبات الطماطم ، نبات البطاطس ، التخصيب المعدني .

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je suis très heureuse de pouvoir exprimer mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord je tiens à adresser mes remerciements les plus profonds au **P<sup>r</sup> Boutekrabt** pour son aide précieuse et ses encouragements permanents et ceci malgré ses nombreuses responsabilités.

Je remercie vivement **D<sup>r</sup> Benchabane** d'avoir pris la responsabilité de diriger ce travail. Ses conseils, ses orientations et ses critiques m'ont été très bénéfiques tout au long de cette étude.

Mes remerciements les plus profonds s'adressent au **P<sup>r</sup> Benmoussa** qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette soutenance.

J'adresse également mes remerciements à **M<sup>r</sup> Boutahraoui** pour avoir accepté très aimablement de faire partie de ce jury et d'examiner ce travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à tous les enseignants du département des sciences agronomiques (**USDB**) qui ont contribué à ma formation.

**M<sup>r</sup> Arous**, directeur de la station expérimentale de l'institut technique des cultures maraîchères et industrielles (**ITCMI**, Staoueli), en m'autorisant à réaliser mes expérimentations au sein de cette belle institution a grandement facilité mes recherches. Je lui exprime ici toute ma gratitude. Ma sincère reconnaissance va aussi à **M<sup>elle</sup> Bedj Mimi** et tout le personnel technique pour leur précieuse aide et leur accueil chaleureux. Je n'oublierai pas de remercier les ouvriers et les gardiens de l'ITCMI en particulier **M<sup>r</sup> Charfi** pour leur disponibilité et leur patience sur le terrain.

**M<sup>r</sup> Aouane**, m'a accueilli au laboratoire de pédologie de l'institut technique de l'arboriculture fruitière (**ITAF**, Tessala El Merdja) et m'a permis d'exécuter mes analyses du sol. Mes remerciements les plus sincères s'adressent également à **M<sup>elle</sup> Benlarbi** ingénieur d'état en agronomie et tout le personnel du laboratoire qui m'ont énormément aidée.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance aux enseignants chercheurs, ingénieurs et techniciens des laboratoires de Microbiologie, Mycologie, Chimie, Zoologie et Zootechnie du département d'agronomie (**USDB**) et plus particulièrement à **M<sup>elle</sup> Ben said Fatiha**, **M<sup>elle</sup> Fadil Djamila** et **M<sup>m</sup> Kesri Samia** à qui j'adresse toute mon amitié.

**M<sup>elle</sup> Badaoui Sadjia** à qui je témoigne une reconnaissance absolue, pour sa disponibilité et son engagement, mérite un remerciement spécial.

Ma famille m'a encouragée, aidée, soutenue et supportée tout au long de mon parcours universitaire. Toutes les difficultés ont été aplanies par leur sollicitude permanente. Je leur dédie ce travail.

Enfin mes remerciements vont à tous mes amis (es), qui ont toujours été là pour moi, ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire.

## TABLE DES MATIERES

RESUME	
REMERCIEMENTS	
TABLE DES MATIERES	
LISTES DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	
INTRODUCTION.....	12
1. GENERALITES SUR LES RHIZOBACTERIES ET LES PSEUDOMONAS.....	16
1.1 Les différentes catégories de bactéries rhizosphériques.....	16
1.2 Les facteurs influençant la diversité rhizosphérique.....	21
1.3 Notion de rhizosphère.....	23
1.4 Colonisation et compétence rhizosphériques.....	26
1.5 La relation Racines – Rhizobactéries.....	28
1.6 Les <i>Pseudomonas</i> spp. Fluorescents.....	30
1.7 Mode d'action des PGPR .....	33
1.8 Utilisation pratique des rhizobactéries bénéfiques PGPR.....	44
2. MATERIELS ET METHODES.....	49
2.1. Souches bactériennes.....	49
2.2 Description du site d'expérimentation.....	50
2.3 Présentation des essais de phytostimulation.....	54
2.4 Analyse statistique.....	79
3. RESULTATS DE LA CULTURE DE TOMATE.....	81
3.1 Phytostimulation de la tomate.....	81
3.2 Activité rhizosphérique.....	107
3.3 Gains des paramètres étudiés.....	111
4. RESULTATS DE LA CULTURE DE POMME DE TERRE.....	122
4.1 Phytostimulation de la pomme de terre.....	122
4.2 Activités rhizosphériques.....	133
4.3 Gains des paramètres étudiés.....	135
5. INTERPRETATION GENERALE.....	140
CONCLUSION.....	162
APPENDICES.....	166
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	185

## LISTES DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Degré des associations des rhizobactéries PGPR avec les cellules des racines : les PGPRi et les PGPRE	20
Figure 1.2	Colonisation des racines de tomate par une souche de <i>Pseudomonas fluorescens</i> , et leur attachement au chevelu racinaire après inoculation des semences avec une suspension bactérienne marquée	32
Figure 2.1	Disposition des douze plaquettes d'alvéoles dans la pépinière	58
Figure 2.2	Dispositif expérimental de la culture de Tomate sous serre en Blocs aléatoires complets (BAC)	60
Figure 2.3	Photo de la serre après plantation suivant le dispositif expérimental	62
Figure 2.4	Tubercules désinfectés avant leur prégermination	71
Figure 2.5	Dispositif expérimental de la culture de Pomme de terre en plein champ (variété SPUNTA) en blocs aléatoires complets (BAC)	74
Figure 2.6	Plantation des tubercules de pomme de terre, suivie de leur bactérisation selon le dispositif expérimental	75
Figure 2.7	Présentation du dispositif expérimental avec les pancartes explicatives	76
Figure 3.1	Evolution de la levée des plantules de tomate	82
Figure 3.2	Taux de germination des deux variétés de tomate, Nedjma (V1) et Agora (V2)	83
Figure 3.3	Effet de la bactérisation sur la hauteur des plants (avant transplantation).	84
Figure 3.4	Evolution de la culture de tomate selon les stades phénologiques : production de feuilles, floraison, nouaison, maturation des fruits.	85
Figure 3.5	Effet de la bactérisation sur la longueur des racines	86

Figure 3.6	Effet de la bactérisation sur le nombre de feuilles	88
Figure 3.7	Effet de la bactérisation sur le poids frais de la partie aérienne	91
Figure 3.8	Effet de la bactérisation sur le poids frais de la partie souterraine	93
Figure 3.9	Effet de la bactérisation sur le poids sec de la partie souterraine	93
Figure 3.10	Présentation des fruits de tomate récoltés en pleine production selon les traitements étudiés	97
Figure 3.11	Effet de la bactérisation sur le poids moyen du fruit par plant (Récolte 5)	100
Figure 3.12	Effet de la bactérisation sur le poids des fruits produits par plant (Récolte 5)	103
Figure 3.13	Effet de la bactérisation sur le poids des fruits produits par plant (Récolte 6)	104
Figure 3.14	Effet de la bactérisation sur le taux des protéines totales	107
Figure 3.15	Effet de la bactérisation sur l'assimilation du phosphore	108
Figure 3.16	Effet de la bactérisation sur l'assimilation du potassium	109
Figure 3.17	Dynamique des populations bactériennes des cinq souches pour la variété Nedjma (V1) et Agora (V2) :	112
Figure 3.18	Gains (%) en hauteur des plants et en longueur des racines de tomate au stade pépinière; effet simple de la bactérisation	114
Figure 3.19	Gains (%) en longueur des racines de tomate au stade pépinière; effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)	114
Figure 3.20	Gains (%) en poids frais de la partie aérienne et souterraine des plants de tomate (stade pépinière); effet simple de la bactérisation	114
Figure 3.21	Gains (%) en poids frais de la partie aérienne des plants de tomate (stade pépinière); effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)	114
Figure 3.22	Gains (%) en poids sec de la partie souterraine des plants de tomate (stade pépinière); effet simple de la bactérisation	116

Figure 3.23	Gains (%) en hauteur des plants de tomate après transplantation; effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)	116
Figure 3.24	Gains (%) en nombre de feuilles des plants de tomate après transplantation; effet simple de la bactérisation	116
Figure 3.25	Gains (%) en nombre de feuilles des plants de tomate après transplantation; effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)	116
Figure 3.26	Gains (%) en poids moyen des fruits de tomate (récolte 5); effet simple de la bactérisation	118
Figure 3.27	Gains (%) en poids moyen des fruits de tomate (récolte 5); effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)	118
Figure 3.28	Gains (%) en poids des fruits par plant de tomate (récolte 1); effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)	118
Figure 3.29	Gains (%) en poids des fruits par plant des récoltes 5 et 6; effet simple de la bactérisation	118
Figure 3.30	Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les feuilles de tomate (premier dosage); effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)	120
Figure 3.31	Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les feuilles (deuxième dosage) et dans les fruits de tomate; effet simple de la bactérisation	120
Figure 3.32	Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les feuilles de tomate (deuxième dosage); effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)	120
Figure 3.33	Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les fruits de tomate; effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)	120
Figure 3.34	Gains (%) en taux de Phosphore et Potassium; effet simple de la bactérisation (culture de tomate)	121
Figure 3.35	Gains (%) en taux de phosphore; effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora) (culture de tomate)	121

Figure 3.36	Gains (%) en taux de potassium; effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora) (culture de tomate)	121
Figure 4.1	Taux de germination des tubercules de pomme de terre pour l'essai avec fertilisation minérale (E1) et l'essai sans fertilisation (E2)	122
Figure 4.2	Effet de la bactérisation sur le taux de levée des tubercules 1 <sup>ère</sup> date de suivi (21 jours après la plantation)	123
Figure 4.3	Présentation des deux essais de la culture de pomme de terre après levée de la totalité des tubercules	124
Figure 4.4	Présentation du plant complet ; partie aérienne, partie souterraine et tubercule de chaque traitement (Essai 1 avec fertilisation minérale)	125
Figure 4.5	Présentation du plant complet ; partie aérienne, partie souterraine et tubercule de chaque traitement (Essai 2 sans fertilisation minérale)	126
Figure 4.6	Effet de la bactérisation sur le poids frais de la partie aérienne	128
Figure 4.7	Effet de la bactérisation sur le taux de protéines totales contenues dans les feuilles	132
Figure 4.8	Effet de la bactérisation sur le taux de protéines totales contenues dans les tubercules	132
Figure 4.9	Dynamique des populations bactériennes des cinq souches pour les deux essais (E1 : essai avec fertilisation minérale, E2 : essai sans fertilisation minérale)	136
Figure 4.10	Gains (%) en taux de levée des tubercules de pomme de terre; effet simple de la bactérisation	138
Figure 4.11	Gains (%) en diamètres des tiges de pomme de terre; effet interactif des souches bactériennes avec les deux essais (avec fertilisation minérale et sans fertilisation minérale)	138
Figure 4.12	Gains (%) en poids frais de la partie aérienne des plants de pomme de terre; effet simple de la bactérisation	138
Figure 4.13	Gains (%) en poids frais de la partie aérienne des plants de pomme de terre; effet interactif des souches bactériennes avec les deux essais (avec fertilisation minérale et sans fertilisation minérale)	138

Figure 4.14	Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les feuilles et dans les tubercules de pomme de terre; effet simple de la bactérisation	139
Figure 4.15	Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les feuilles de pomme de terre; effet interactif des souches bactériennes avec les deux essais (avec fertilisation minérale et sans fertilisation minérale)	139
Figure 4.16	Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les tubercules de pomme de terre; effet interactif des souches bactériennes avec les deux essais (avec fertilisation minérale et sans fertilisation minérale)	139
Figure 4.17	Gains (%) en taux de Phosphore et de potassium; effet simple de la bactérisation (culture de pomme de terre)	139
Tableau 1.1	Evolution des populations bactériennes en fonction des distances par rapport au système racinaire	24
Tableau 2.1	Origines des souches bactériennes de <i>Pseudomonas fluorescens</i>	49
Tableau 3.1	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur la hauteur des plants de tomate (cm)	87
Tableau 3.2	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur la longueur des racines (cm)	87
Tableau 3.3	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le nombre de feuilles	90
Tableau 3.4	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le diamètre des tiges (cm)	90
Tableau 3.5	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le poids frais et le poids sec de la partie aérienne et souterraine (g)	92
Tableau 3.6	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le nombre de bouquets floraux	95
Tableau 3.7	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le nombre et le diamètre des fruits noués (cm)	96
Tableau 3.8	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le poids moyen des fruits (g)	99

Tableau 3.9	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le diamètre moyen des fruits (cm)	101
Tableau 3.10	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le poids des fruits par plant (g)	102
Tableau 3.11	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le poids frais et sec (g) des fruits en période de pleine production (récolte 4)	106
Tableau 3.12	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le taux de protéines totales (mg/ml)	106
Tableau 3.13	Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le taux du phosphore (ppm) et du potassium (meq/100g de sol)	110
Tableau 3.14	Résultats des concentrations bactériennes (CFU/ g de sol) dans la rhizosphère et à proximité des racines pour les deux variétés de tomate	111
Tableau 4.1	Effet de l'interaction (souches bactériennes x fertilisation minérale) sur les paramètres de croissance	127
Tableau 4.2	Effet de l'interaction (souches bactériennes x fertilisation minérale) sur le poids frais et poids sec de la partie aérienne et souterraine (g)	129
Tableau 4.3	Effet de l'interaction (souches bactériennes x fertilisation minérale) sur les paramètres de production	131
Tableau 4.4	Effet de l'interaction (souches bactériennes x fertilisation minérale) sur le taux des protéines totales (mg/ml)	131
Tableau 4.5	Effet de la bactérisation sur le taux de phosphore (ppm) et potassium (meq/100g de sol)	134
Tableau 4.6	Résultats des concentrations bactériennes (CFU/ g de sol) dans la rhizosphère et à proximité des racines pour l'essai avec fertilisation minérale (Essai 1) et sans fertilisation minérale (Essai 2)	135

## INTRODUCTION

Les systèmes agricoles conçus par l'homme s'articulent globalement sur des pratiques culturelles, traditionnelles ou modernes, pour tirer le meilleur parti de l'eau, de l'espace, du travail investi et de la fertilité du sol qui résulte en grande partie de processus biologiques. [1]

Face à une perte de fertilité du sol, l'agriculture conventionnelle est entrée dans un cycle infernal en utilisant toujours plus d'engrais chimiques, qui n'enrichissent pas le sol durablement [2, 3, 4, 5]. Depuis 1964, la consommation d'engrais dans le monde a rapidement augmenté, celle des engrais azotés affichant le score le plus marqué. La production mondiale d'engrais azotés a dépassé les 80 millions de tonnes en l'an 2000. Celle des engrais phosphatés excédait les 30 millions de tonnes et la consommation des engrais potassiques a atteint environ 20 millions de tonnes la même année [6].

Cette fertilisation excessive peut être une source de nuisances pour la santé humaine et l'environnement : pollution des eaux de surface et des nappes phréatiques par lessivage des engrais (les nitrates), présence de résidus toxiques sur les fruits et légumes consommés par l'homme diminuant fortement leur qualité sanitaire, forte consommation d'énergie et émission de gaz à effet de serre pour la production des engrais azotés [2, 3, 7, 4, 5, 8, 9].

A une époque où tous les intervenants du secteur agricole, des secteurs de l'écologie et de la santé reconnaissent l'urgence de minimiser les dangers occasionnés par l'usage abusif des produits chimiques, la mise au point de stratégies innovatrices, fiables et respectueuses de l'environnement, conduira inévitablement à de grands progrès dans la production de plantes cultivées à intérêt économique [10, 11, 12, 13, 7].

Un nouveau concept est apparu avec l'agriculture durable ou soutenable, qui propose de produire sans gaspillage de l'énergie, d'exploiter le sol sans

l'épuiser, d'intervenir sans polluer [1, 12, 14]. Les initiateurs de ce concept avaient pris conscience que la production agricole dépendait d'équilibres biologiques complexes et que leur rupture pouvait avoir des conséquences désastreuses. Ces équilibres ne sont pas naturellement parfaits et nous pouvons les modifier dans un sens plus favorable à la croissance des plantes et ceci par plusieurs solutions viables notamment la réduction des intrants chimiques (engrais et consommation d'énergie) et le recours à d'autres sources de fertilisation organique ou biologique [1, 6, 13, 4].

Le recours accru aux associations racinaires semble être une solution prometteuse, des études récentes ont porté sur le potentiel de la création de biofertilisants ; des produits à base de microorganismes capables d'aider les végétaux à fixer biologiquement l'azote, à absorber les éléments nutritifs phosphoreux du sol et à favoriser d'une manière générale la croissance des plantes. Parmi la myriade de microorganismes bénéfiques, les bactéries symbiotiques, les champignons mycorhizogènes et les rhizobactéries PGPR (plant growth promoting rhizobacteria) sont les plus étudiées [6, 15, 16, 13, 17, 4, 18, 19].

Les rhizobactéries stimulatrices de la croissance des végétaux, récemment découvertes, sont considérées comme des éléments principaux pour l'établissement des plantes sous des conditions de déséquilibre nutritionnel. Elles peuvent améliorer la croissance des plantes, la nutrition des plantes, modèlent la croissance des racines, la compétitivité des plantes et les réponses aux facteurs de stress externes. Différentes rhizobactéries PGPR comme les : *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Serratia*, *Agrobacterium*, *Radiobacter* ont été utilisées pour leurs effets bénéfiques significatifs sur la croissance et la production des cultures sous diverses conditions [15, 16, 20, 21]. A la suite de l'intérêt suscité par de nombreux travaux et publications, une grande part des recherches réalisées sur les rhizobactéries est maintenant effectuée sur des bactéries appartenant au groupe des *Pseudomonas* spp fluorescents [22, 23, 24, 25].

Ces rhizobactéries peuvent affecter la croissance et le développement des plantes par la production de métabolites secondaires (régulateurs de croissance de plantes (phytohormones) et substances biologiquement actives), en diminuant ou en empêchant les effets délétères des organismes phytopathogènes dans la rhizosphère et en facilitant la disponibilité et le prélèvement de certains éléments nutritifs (Azote, Phosphore, Potassium, Fer) dans l'environnement racinaire [26, 27, 28].

La culture de la tomate occupe actuellement une place prépondérante dans l'économie agricole algérienne. Sur une superficie globale de primeurs évaluée à plus de 292 000 hectares, 1045 hectares sont consacrés annuellement à la culture de la tomate sous serre, représentant ainsi 36% du potentiel serres en place. La particularité écologique de cette culture lui a conférée cette place dans l'agriculture algérienne où elle représente 51% de la production totale en produits maraîchers [29, 30].

Selon le ministère de l'Agriculture (2007), l'Algérie a presque doublé sa production de pomme de terre en l'espace de cinq ans, passant de 12 760 000 quintaux en 2000 à 21 765 000 quintaux en 2005. La superficie cultivée est passée de 72 500 hectares en 2000 à 95 000 hectares en 2005, elle occupe en moyenne chaque année plus de 26% de la sole maraîchère évaluée à 300.000 hectares.

En dépit du développement qu'a connu le secteur de l'agriculture en Algérie ces dernières années, beaucoup reste à faire, notamment en ce qui concerne la détermination des stratégies et des cultures à développer. Selon une étude de la croissance économique effectuée en 2006, malgré l'extension des superficies légumières et une production de 40 millions de quintaux, les rendements restent très modestes et le pays reste confronté à d'importantes augmentations des prix de certains produits comme la pomme de terre et la tomate [30].

Il existe un potentiel énorme à utiliser les rhizobactéries PGPR comme bioinoculum pour une grande variété de plantes cultivées et dans un large éventail de climat et de conditions édaphiques. Les recherches concernant ces bactéries et leurs modes d'action augmentent rapidement comme les efforts fournis pour

leur exploitation commerciale telle des biofertilisants. Un nombre de plus en plus important de rhizobactéries stimulatrices de la croissance des végétaux est lancé sur le marché ; l'utilisation est autorisée et parfois interdite mais le marché pour ces bioinoculums est en pleine extension [31, 15, 32].

Dans des travaux précédents [22, 33, 1, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 24, 41, 42, 43], le potentiel phytostimulateur de plusieurs souches de *Pseudomonas* spp fluorescents a été mis en évidence dans des conditions expérimentales contrôlées. Malgré l'abondance de ces travaux de recherches, les exemples d'application pratique à grande échelle de ces rhizobactéries utiles restent limités. En effet, la mise en œuvre de ces microorganismes nécessite des études finalisées dans des conditions naturelles de plein champ. Notre étude vient d'apporter une contribution à cette thématique car l'objectif principal est la mise en évidence de la biostimulation de quelques souches de l'espèce bactérienne *Pseudomonas fluorescens* sur la croissance, le développement et la production de deux cultures distinctes conduites différemment :

- La culture de tomate conduite sous une serre plastique.
- La culture de pomme de terre conduite en plein champ.

## **CHAPITRE 1**

### **GENERALITES SUR LES RHIZOBACTERIES ET LES PSEUDOMONAS**

#### 1.1 Les différentes catégories de bactéries rhizosphériques

Les rhizobactéries sont des bactéries qui présentent l'aptitude à coloniser les racines de façon intense, il s'agit de bactéries adaptées à un biotope particulier, la rhizosphère, siège d'échanges intenses entre la plante et le milieu environnant. Les bactéries du sol non symbiotiques qui répondent à cette définition appartiennent à différents genres dont les plus étudiés sont : *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Serratia*, *Agrobacterium*, *Radiobacter* [44, 45, 22, 33, 31, 15, 46, 16].

DAVET [1], .STURZ et al [47] et COHEN et al [48] rapportent que les microorganismes adaptés à la rhizosphère ont une activité métabolique élevée et se multiplient très rapidement. En vertu de leur adaptabilité physiologique et polyvalence métabolique, les rhizobactéries représentent un facteur principal des changements dans les écosystèmes agronomiques.

L'environnement complexe du sol est caractérisé par la libération d'une part significative de photosynthétates qui seront utilisés par les microorganismes avec un catabolisme mieux adapté. Les populations rhizosphériques sont alors caractérisées pour leur capacité à utiliser un large groupe de composés organiques, à mobiliser le fer et à utiliser des oxydes d'azote à des fins respiratoires [49, 23, 37, 50].

Un grand nombre de bactéries s'adapte à la rhizosphère avec différents effets sur les plantes cultivées. Ainsi la rhizosphère des plantes héberge trois catégories de bactéries : ceux qui sont indifférents à effet neutre, ceux qui sont pernicious ou délétères à effet néfaste et ceux qui stimulent la croissance et induisent des effets bénéfiques sur la croissance des plantes. Ainsi les Interactions bactéries-plantes peuvent être subdivisées en trois classes: symbiotique, pathogène et associative : [1, 49, 51, 35, 52, 47, 53]

- L'interaction symbiotique se caractérisant par des effets bénéfiques réciproques à l'exemple de la formation des nodules de racine qui sont colonisées par un microsymbiote qui a la capacité de fixer l'azote atmosphérique et de libérer l'azote fixé au macrosymbiote (les plantes).
- Les Interactions phytopathogéniques sont plus diverses ; les espèces de bactéries phytopathogènes ont développé des méthodes spécifiques pour parasiter les plantes afin d'assurer les besoins nutritifs de leur propre croissance.
- Dans l'interaction associative, les bactéries et les plantes profitent l'un de l'autre ; les plantes activent et soutiennent les communautés bactériennes qui vivent des exsudats racinaires, parallèlement les bactéries protègent les plantes en supprimant les agents pathogènes et en stimulant leur croissance en fournissant des substances bactériennes spécifiques et assimilables.

#### 1.1.1 Effet bénéfique des rhizobactéries : Les PGPR

Malgré la méconnaissance des actions bactériennes, l'utilisation des microorganismes pour stimuler la croissance des plantes en agriculture a été exploitée depuis des périodes antiques. Ainsi pendant la période 372–287 AJ, on suggérait le mélange de différents sols en tant que moyens pour remédier à des déficits et pour renouveler le sol. Un tel mélange de sols a pu avoir divers effets positifs, mais c'est sans doute l'introduction de la flore microbienne bénéfique, en particulier *Rhizobia* pour la production de légumineuse, qui aurait été un des premiers effets positifs [15].

Selon LEMANCEAU [22], GAGNE et al [33], MOËNNE-LOCCOZ [31] et VESSEY [15], les rhizobactéries bénéfiques incluent les microorganismes symbiotiques, saprophytiques et autotrophes. Leur étude a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs. Les effets bénéfiques des rhizobactéries sont liés à leur position stratégique à l'interface sol- racine.

Les principales interactions bénéfiques entre plantes et rhizobactéries sont principalement illustrées par les symbioses des bactéries fixatrices d'azote dans les nodosités des légumineuses. A côté de cela, il existe une forme d'interaction

stimulant la croissance des végétaux mais n'aboutissant pas à la formation de structures anatomiques spécifiques, cette forme d'interaction concerne la grande majorité des plantes. Les bactéries assurant des effets bénéfiques sur la stimulation de croissance sont connues sous la dénomination des rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), appelées également rhizobactéries favorisant la croissance végétale (RFCV) [54, 26, 28, 55, 37, 56].

L'interaction plante - PGPR constitue un modèle original, différent et complémentaire des modèles d'interactions plante - microorganismes les plus étudiés jusque là ; symbiotiques ou pathogènes. La recherche sur les PGPR a suscité de nombreux travaux d'expérimentation qui ne cesse de croître et ce depuis la première utilisation du terme par KLOEPPER et ses collaborateurs vers la fin de années 1970 [57]. Plusieurs laboratoires de recherche se sont intéressés aux bactéries rhizosphériques stimulatrices de la croissance des plantes (PGPR), il est actuellement l'un des groupes de microorganismes de la rhizosphère, ayant reçu une attention particulière [58, 27, 15, 28, 37, 46, 59].

En se rapportant aux résultats de ces recherches, il en ressort que deux types de mécanismes sont responsables de ces effets bénéfiques. L'effet est direct, lorsque la bactérie stimule la croissance des plantes conduisant à une production de biomasses racinaire et/ou aérienne accrues même en conditions axéniques, et à une amélioration du rendement en produits récoltables (symbiose associative entre la bactérie PGPR et sa plante-hôte). L'effet est indirect quant il y a modification des équilibres microbiens au niveau de la rhizosphère contrôlant ainsi les organismes phytoparasites (antagonisme) [22, 33, 52, 31, 15, 37, 46, 60, 56].

DI BATTISTA-LEBOEUF et al [61], GAMALERO et al [52], ZAHIR et al [28] et GILLES et al [39] expliquent que l'interaction entre bactéries phyto-bénéfiques de type plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) et la plante conduit à des modifications du métabolisme et de la physiologie de cette dernière en termes de mécanismes de défense, fonctionnement hormonal, et exsudation racinaire. Ces modifications concernent notamment le métabolisme secondaire des plantes.

La biotisation (terme créé pour illustrer cette association) consiste à utiliser des micro-organismes bénéfiques pour stimuler la croissance des plantes et les protéger contre les attaques des bio-agresseurs. Les micro-organismes considérés appartiennent au groupe des bactéries libres ou symbiotiques des PGPR mais aussi au groupe des champignons (endomycorhizogènes et antagonistes) [1, 62, 40].

Selon VESSEY [15], pour avoir l'effet bénéfique des PGPR sur la croissance des plantes, ces rhizobactéries doivent avoir évidemment une relation intime avec les plantes hôtes. Le degré de cette relation peut varier selon le site et le mécanisme de colonisation des plantes hôtes par les PGPR. Ces relations peuvent être classées en deux niveaux de complexité: rhizosphérique et endophytique.

Dans le même contexte GRAY et al [60] signalent que l'association des bactéries de la promotion de la croissance des plantes (Plant growth promoting bacteria ; PGPR) se classe parmi les bactéries de proximité avec les racines. En général, elles peuvent être classées en deux catégories : (Figure 1.1)

- Les PGPR extracellulaires (PGPRe), existant dans la rhizosphère, sur le rhizoplan ou dans l'espace entre les cellules du cortex racinaires. Ces PGPR ne produisant pas des nodules mais augmentant la croissance de plantes à travers la production de composé secondaires qui stimulent directement la croissance des plantes, améliorent la résistance des plantes aux maladies, et/ou améliorent la mobilisation des nutriments du sol.
- Les PGPR intracellulaires (PGPRi), qui vivent à l'intérieur des cellules racinaires, généralement dans des structures spécialisées telles que les nodules.

Les PGPR rhizosphériques (PGPRe) incluent des genres comme *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Erwinia*, *Caulobacter*, *Serratia*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*, *Chromobacterium*, *Agrobacterium* [63, 55].

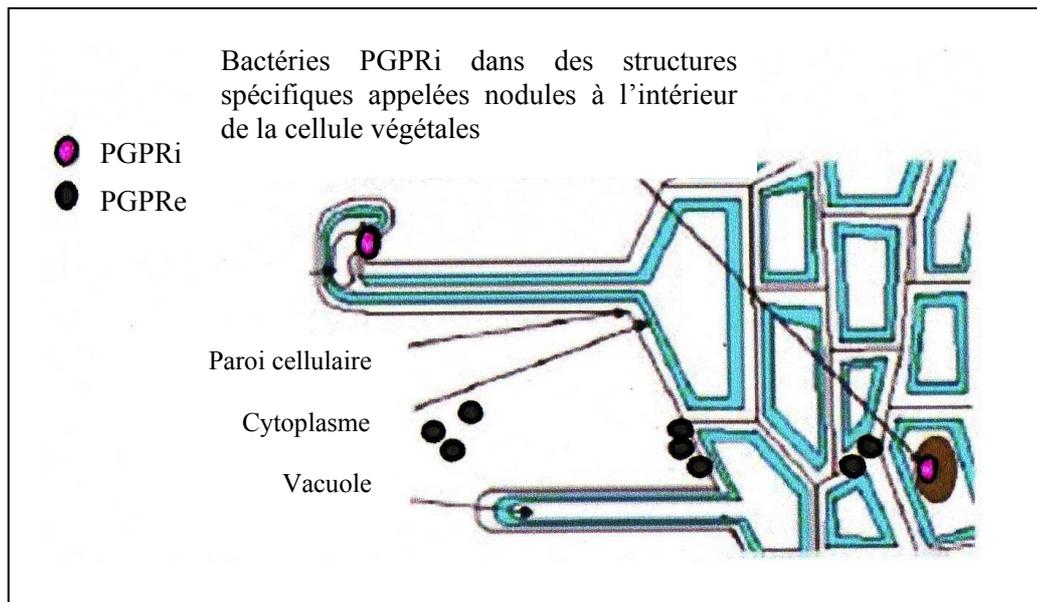


Figure 1.1 : Degré des associations des rhizobactéries PGPR avec les cellules des racines : les PGPRi et les PGPRe [97]

### 1.1.2 Effet délétère des rhizobactéries

Hormis l'existence de ces relations bénéfiques entre les rhizobactéries et les plantes, plusieurs auteurs ont rapporté que des proportions non négligeables de bactéries isolées à partir du rhizoplan montrent des activités néfastes retardant la croissance et entraînant la réduction de la phytomasse. SUSLOW et SCHORTH (1982) ont créé à l'occasion le terme de Deleterious Rhizobacteria DRB pour rhizobactéries délétères (ou pernicieuses) [22, 1, 35].

Dans des travaux réalisés par ALSTRÖM (1990), rapportés par BERGGREN et al [51], il a été prouvé qu'une partie des souches bactériennes de la rhizosphère (8 –26%) exerce une action délétère sur la croissance des plantes.

En général les rhizobactéries à effet pernicieux causent des dommages aux plantes à travers différents mécanismes sans être parasites et ceci par la synthèse de divers métabolites bactériens (HCN, antibiotiques, sydérophores, etc,) qui provoquent soit une compétition avec les plantes soit une phytotoxicité [64, 22, 1].

Selon BERGGREN et al [51], la compréhension détaillée des caractères inhibiteurs des bactéries mènerait à l'identification des mécanismes de la concurrence et la survie entre divers groupes de bactéries dans la rhizosphère. Cette information sera essentielle pour créer les conditions nécessaires pour favoriser les rhizobactéries de la promotion de la croissance des plantes (PGPR) dans des pratiques culturales.

Enfin d'après les mêmes auteurs, les Changements des pratiques culturales, l'état nutritif, les populations microbiennes, la température du sol et le génotype des plantes ont montré leur influence sur la capacité de certaines souches bactériennes d'exprimer des effets délétères.

### 1.2 Facteurs influençant la diversité rhizosphérique

BLOEMBERG et al [58] mentionnent que les interactions des rhizobactéries avec leur environnement biotique et abiotique sont souvent complexes. D'après JOSSI et al [65] et VIEIRA et al [66], La composition de la communauté bactérienne résulte de l'interaction entre le type de sol, l'espèce végétale et la localisation de la rhizosphère.

Globalement, toutes les altérations (changements) anthropogéniques pour améliorer la productivité des sols (labour, monoculture, rotation de culture, irrigation, application des amendements et chimies de la protection de cultures, etc.) semblent rompre significativement l'établissement de l'écosystème rhizosphérique [47, 67, 66].

Plusieurs auteurs signalent que pour déterminer les effets bénéfiques, les *Pseudomonas* doivent disposer d'un environnement favorable à l'expression de leurs activités spécifiques et à leur survie. Les éléments de cet environnement qui pourraient avoir un effet direct sur leurs activités sont :

- L'espèce végétale ; par la composition des exsudats racinaires et l'existence d'une spécificité entre la bactérie et la plante hôte [68, 22, 34, 69, 65, 70, 71].

- Les pratiques agricoles ; Les gestions des cultures influenceront les processus écologiques qui affectent les communautés bactériennes de la rhizosphère [72, 73, 74, 75, 67].
- Les caractéristiques biologiques du sol notamment les caractéristiques microbiologiques [22, 65].
- Les caractéristiques physico-chimiques du sol : la texture du sol, l'humidité du sol, la température et le pH [22, 34, 69, 73, 65, 76].

### 1.2.1 Facteurs liés aux pratiques agricoles

La composition des souches bactériennes du sol à un site tellurique donné est nettement influencée par la gestion du sol et son dispositif. Ainsi, la microdiversité bactérienne observée reflète les conditions de l'habitat, qui sélectionne les formes les mieux adaptées [69, 77, 48].

Selon TIQUIA et al [72], BENIZRI et al [77], ZHANG et al [78], GINOVART et al [79] et VAÏSÄNEN et al [67], les pratiques de gestion agricoles : la fertilisation, la rotation de cultures, l'application des amendements organiques, et le labour peuvent favoriser certains micro-organismes plus que d'autres et affectent ainsi la structure et le fonctionnement de la communauté microbienne.

Une compréhension des agro écosystèmes est la clef pour mesurer l'influence des méthodes de production agricole sur l'environnement. Plusieurs études indiquent que la fertilisation et ses formes en général (organique ou inorganique) affectent d'importantes propriétés fonctionnelles et structurelles de la communauté microbienne du sol. La présence de ces substances organiques et inorganiques dans le sol est associée avec une augmentation générale de la quantité des éléments nutritifs affectant ainsi l'activité bactérienne [72, 74, 75, 48, 71, 67].

L'introduction d'un composé xénobiotique comme les pesticides (composés organiques synthétiques) dans le sol peut avoir des conséquences importantes sur l'écologie microbienne. En présence de certains pesticides plusieurs activités microbiennes peuvent être inhibées [1, 80].

### 1.2.2 Influence des espèces végétales sur les rhizobactéries

D'après DAVET [1] l'abondance et la composition de la microflore varient considérablement selon les familles de plantes. Une variabilité importante entre des espèces appartenant à la même famille botanique et même, éventuellement entre diverses variétés d'une même espèce a été observée. Ainsi les caractéristiques génétiques de la plante déterminent largement, par la quantité et la qualité de la rhizodéposition, la composition de la microflore qui lui est associée.

FROMIN et al [81] ont signalé l'existence d'une spécificité des plantes dans la stimulation sélective de certaines bactéries de la rhizosphère. Par définition, durant la croissance, les plantes changent la composition physique et chimique du sol dans la rhizosphère comparé à la masse du sol loin des racines ce qui peut affecter les capacités d'une bactérie à coloniser la rhizosphère [15].

BENIZRI et al [77] précisent que le carbone organique libéré par les racines dans la rhizosphère est considéré comme une force motrice de l'activité et de la densité bactérienne.

JACQUES et al [82] et GRAY et al [60] ont montré une spécificité plante - rhizobactérie qui pourrait être associée à la nature des lipopolysaccharides et des protéines membranaires bactériens qui varient selon l'espèce végétale dont elles sont isolées. Ces lipopolysaccharides jouent effectivement un rôle déterminant dans la colonisation racinaire.

### 1.3 Notion de rhizosphère

La rhizosphère fut définie en 1904 par le biologiste allemand HILTNER ; c'est un espace étroit adjacent aux racines des plantes, massivement peuplé, soumis directement ou indirectement à l'action de ces racines. Ces dernières doivent concurrencer les systèmes racinaires envahissant des plantes voisines pour l'espace, l'eau, et les éléments minéraux, et avec d'autres organismes telluriques, incluant des bactéries et des champignons [72, 52, 83, 84, 85, 86, 87, 37, 60, 88].

Ainsi la rhizosphère inclut le volume du sol situé au voisinage immédiat des racines des plantes, dépassant souvent quelques millimètres de la surface de

racine et peut inclure l'assise de cellules épidermiques des racines de plantes. L'extension ou le volume varie avec le type du sol, les espèces de plantes, l'âge et autres facteurs. C'est un lieu biologiquement actif où les densités de populations bactériennes sont très fortes, mais où la diversité des espèces est plus faible que dans le reste du sol. Cette réduction de la diversité des espèces s'accompagne d'une baisse de la variabilité intraspécifique [1, 52, 83, 89, 62, 60, 88]. (Tableau 1.1)

Dans cet espace, des interactions entre les organismes du sol (principalement les bactéries), les racines et les constituants de sol ont lieu ; les communications racine- racine et racine- microbe sont des relations continues dans cette zone [90, 86].

Tableau 1.1 : Evolution des populations bactériennes en fonction des distances par rapport au système racinaire (poil absorbant) [62]

Distance par rapport à la surface des racines (mm)	Fréquence estimée ( $10^9$ cellules/cm <sup>3</sup> )	Nombre de bactéries différentes morphologiquement (diversité)
0-1	120	11
1-5	96	12
5-10	41	5
10-15	34	2
15-20	13	2

La rhizosphère est divisée principalement en trois compartiments : [1, 72, 52, 83, 86, 62]

- L'endorhizosphère : volume ou structure à l'intérieur de la racine qui permettent des échanges avec les organismes du sol : nodules de Rhizobium, arbuscules de mycorhizes.
- Le rhizoplan : la surface externe de la racine, lieu d'excrétions et d'échanges biochimiques avec le sol, La surface de la racine constitue donc un habitat particulier ; le rhizoplan. La colonisation du rhizoplan commence très tôt, mais elle n'est jamais complète. Au contraire, même dans un sol

très riche en microorganismes, la couverture microbienne ne constitue jamais une gaine continue autour de la racine.

- L'exorhizosphère : environ 1 mm de rayon autour des racines.

### 1.3.1 Notion de rhizodéposition

D'après DAVET [1], GOBAT et al [83] et WALKER et al [84] une partie importante des composés photosynthétiques produite dans les parties aériennes (environ 20 à 50%, avec un maximum de 80%) est transportée dans les racines par l'intermédiaire du liber. Ces auteurs considèrent que la moitié environ du carbone fixé dans les tissus chlorophylliens est transférée vers les racines, dont une partie (5 à 21 %) peut être considérée comme perdue dans le milieu extérieur sous forme de rhizodéposition. PIUTTI et al [70] signalent que cette dernière change quantitativement et qualitativement durant le cycle de la plante.

L'apport trophique des racines à la rhizosphère résulte des trois processus suivants : [1, 81, 83]

- L'exsudation : c'est la fraction soluble de rhizodéposition, elle désigne la diffusion passive hors des cellules de composés solubles de faible poids moléculaire comprenant des sucres, des acides aminés, des acides gras et des hormones de croissance.
- La sécrétion et excrétion : ce sont des processus actifs, concernant généralement des composés de poids moléculaires élevés : des enzymes, des acides organiques. Le mucilage est l'un des composés sécrétés par plusieurs zones de la racine en particulier par la coiffe, ils sont importants pour l'agrégation des microorganismes et des particules du sol.
- La lyse : les cellules de la coiffe et les poils absorbants ont une durée de vie très limitée, les cellules dégèrent plus ou moins rapidement et représentent un apport parfois très important de matière organique.

Les exsudats racinaires est la fraction la plus importante de la rhizodéposition, ils peuvent représenter 10-20% des photosynthétates. La stimulation significative des populations microbiennes spécifiques est due au niveau de compatibilité de leurs activités métaboliques avec la composition des exsudats racinaires [52, 84, 37]. Ainsi à travers l'exsudation d'une large variété

de composants, les racines peuvent réguler la communauté microbienne du sol à leur proximité immédiate [84].

D'après BAIS et al [86] La connaissance des processus rhizosphériques complexes gérés par la rhizodéposition ne s'est pas développée au même rythme que nos connaissances des racines. Néanmoins, notre compréhension de l'importance de la rhizodéposition dans des interactions de plantes a augmenté sensiblement pendant la dernière décennie. L'intégration des outils moléculaires avec des approches écologiques traditionnelles donne plus d'avance dans ce domaine.

Les activités bactériennes influencées par les exsudats racinaires sont représentées par la synthèse de métabolites tels que les sidérophores, antibiotiques, substances de croissance, acide cyanhydrique et lipopolysaccharides [22, 1, 61].

Enfin selon FROMIN et al [81] et BAIS et al [86] les exsudats racinaires jouent un rôle actif dans la régulation des interactions symbiotiques, protectrices et stimulatrices avec les bactéries. Par l'exsudation d'une grande variété de composés, ces auteurs suggèrent que des racines peuvent régler la communauté microbienne du sol dans leur proximité immédiate, encourager les interactions bénéfiques, changer les propriétés chimiques et physiques du sol, et inhiber la croissance des plantes concurrentes.

#### 1.4 Colonisation et compétence rhizosphériques

Les conditions de vie dans la rhizosphère exercent un effet sélectif sur les populations du sol. Une partie seulement de la microflore tellurique (variable selon les plantes et selon leur état physiologique) est représentée dans cet environnement ; c'est la compétence rhizosphérique que l'on peut désigner par affinité rhizosphérique ou plus simplement rhizocompétence et qui représente selon plusieurs auteurs, l'aptitude d'un microorganisme à croître, à se maintenir et à fonctionner dans la rhizosphère au fur et à mesure que la racine s'allonge [1, 23].

PARKE [91] précise que l'effet bénéfique résultant de l'introduction des rhizobactéries de promotion de la croissance des plantes ou du biocontrôle des maladies telluriques est souvent corrélé à une bonne colonisation des racines. Cette dernière requiert de ce fait une importance fondamentale, mais peu d'informations existent sur ce processus.

Pour qu'une bactérie soit efficace, elle doit pouvoir coloniser efficacement la rhizosphère, survivre et favoriser la croissance des autres organismes utiles au bon développement des plantes [92, 58, 73].

#### 1.4.1 Etapes de la colonisation racinaire

La colonisation de la rhizosphère est l'événement principal de l'interaction associative entre rhizobactéries et plante. Ce phénomène de colonisation peut être décomposé en trois étapes ; [82, 23, 86]

- La perception du végétal et chimiotactisme vers et le long de la racine.
- L'adhésion des microorganismes sur la surface racinaire (rhizoplan).
- La colonisation proprement dite de la rhizosphère, qui implique une consommation des exsudats racinaires.

PÜHLER et al [53] rapportent que les exsudats des plantes sont les conducteurs de l'interaction plante-bactérie. Sous des effets de chimiotactisme, la bactérie libère une réponse à ces exsudats, qui est nécessaire pour une colonisation efficace de la zone entière de racine.

#### 1.4.2 Facteurs influençant la colonisation racinaire

Une colonisation racinaire réussie dépend des caractéristiques des bactéries introduites (le phénotype bactérien), la microflore indigène du sol, la plante hôte (la qualité et la quantité des exsudats racinaires) notamment l'espèce, le cultivar et le stade de développement de la plante, et l'environnement abiotique (la porosité, l'humidité, la texture, la température du sol). Chacun de ces facteurs influence la physiologie et le métabolisme bactériens et par conséquent, leur croissance et leur répartition dans la rhizosphère [91, 1, 23, 36, 86, 46].

Ainsi, selon les mêmes auteurs, un organisme rhizocompétent doit supporter non seulement l'environnement physico-chimique de la racine, mais aussi la forte compétition qui y règne. Cette aptitude peut se traduire par la production d'antibiotiques (les *Pseudomonas* synthétisent une grande variété), de sidérophores, par la résistance aux antibiotiques étrangers et par l'utilisation optimale des molécules disponibles, y compris les plus simples (sucres, acides organiques).

D'autres auteurs ont également signalé que la colonisation racinaire est probablement influencée de façon importante par la formulation de l'inoculum et la méthode d'application [93, 22].

### 1.5 Relation Racines - Rhizobactéries

Les interactions biologiques souterraines sont plus complexes que celles qui se produisent au-dessus de la surface du sol. Elles sont basées sur des échanges complexes qui évoluent autour des racines de plantes [86, 46].

Selon PÜHLER et al [53], en raison du rôle important que déterminent les relations bactéries – plante en agriculture, beaucoup d'efforts ont été fournis pour leur analyse en détail.

#### 1.5.1 Notion de Quorum Sensing

Comment les racines parviennent-elles à communiquer simultanément avec les plantes voisines, et avec les organismes symbiotiques, associatifs et pathogènes dans cette rhizosphère étroite ? L'évidence suggère que les exsudats de racine pourraient initier et manœuvrer les interactions biologiques et physiques entre les racines et les bactéries, et jouer ainsi un rôle actif dans les communications racine- racine et racine- bactéries [86].

LOH et al [94] et ZAHIR et al [28] signalent que plusieurs plantes associées aux bactéries y compris celles habitant la rhizosphère, impliquées dans des relations symbiotiques, pathogènes ou commensales, utilisent un système connu sous le vocable de quorum sensing pour réguler l'expression d'une diversité de gènes, dont certains sont impliqués dans les interactions entre les bactéries et/ou entre les bactéries et les plantes.

Les bactéries libèrent dans la rhizosphère une quantité limitée d'une ou de plusieurs molécules dites de signal, la nature chimique de ces signaux, utilisés dans la communication, change selon l'espèce bactérienne, ils sont appelés autoinducteurs. La concentration de ces molécules de régulation augmente en fonction de la densité bactérienne, jusqu'à un seuil qui peut être perçu au sein de cet environnement par la population bactérienne en question [94, 95, 25].

Pour les bactéries Gram négatif, la communication est généralement assurée par des molécules à faible poids moléculaire ; N-acyl homoserine lactone (N-AHSL). Ces molécules bien que présentes à de faibles concentrations dans l'environnement sont déterminantes dans les relations bactéries – plantes (symbiotiques, pathogènes et associatives) et affectent des fonctions bactériennes principales comme la pathogénécité, la production de siderophores, le transfert de plasmides conjugués, la production des antibiotiques et de composés antifongiques, la sporulation et la bioluminescence etc. [94, 96, 95, 97, 25].

LOH et al [94] et BAUER et al [96] avancent que les bactéries rhizosphériques (pathogènes, symbiotiques, associatives) dépendent essentiellement du quorum sensing (QS) pour coloniser leurs hôtes. Dans ce système de quorum sensing, la production des AHLs, imité par les plantes et les enzymes qui les dégradent, suggère que les bactéries et les plantes aient évolué pour percevoir et utiliser ce signal.

Le quorum sensing est répandu dans le monde bactérien et, généralement, les processus contrôlés par le quorum sensing sont improductifs s'ils sont entrepris par une bactérie individuelle mais deviennent efficace une fois entrepris par un groupe de bactéries. La communication Cellule – cellules peut se produire entre les espèces bactériennes, et entre les bactéries et leurs hôtes végétaux, suggérant un lexique chimique complexe [98, 97].

Il est maintenant évident que les plantes, à leur tour, perçoivent ces signaux bactériens et répondent par des voies complexes à l'information. Les plantes sécrètent également des composés qui imitent les signaux bactériens et profitent de la régulation du quorum sensing chez les bactéries [96].

### 1.6 Les *Pseudomonas* spp. fluorescents

Parmi les dernières études sur les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR), une importante attention a été attribuée au groupe des *Pseudomonas* spp fluorescents [22, 61, 52, 15].

SINDHU et al [35] et LATOUR et al [23] déclarent que les *Pseudomonas* spp fluorescents sont considérés comme des rhizobactéries du moment que leurs densités et activités sont stimulées dans la rhizosphère.

Cependant, les *Pseudomonas* sont de véritables organismes ubiquistes, cette ubiquité semblant être une conséquence de leur très large versatilité nutritionnelle ; par la gamme de composés organiques qu'ils peuvent utiliser et la diversité de leur métabolisme. Ces caractères confèrent aux souches de *Pseudomonas* le pouvoir d'évoluer dans des niches écologiques très diverses : elles vivent ainsi en saprophytes ou en parasites dans les sols, l'eau (eaux douces, eaux saumâtres, eaux de mer) et sur les végétaux [82, 99, 100, 101, 102, 59, 103, 104].

Ainsi, d'après LATOUR et al [23] et BENCHABANE et al [105] les *Pseudomonas* spp fluorescents ont la capacité d'adapter leur métabolisme à des environnements variés en les colonisant, et plus spécialement à l'évolution de la composition des exsudats racinaires selon les espèces de plantes, leur développement et le type de sol.

L'étude menée par BUDDRUS et al [24] a mis en évidence les possibilités de retrouver des *Pseudomonas* dans toutes les parties racinaires, particulièrement dans la zone du chevelue racinaire, dans les extrémités racinaires et dans les cellules corticales des racines (endophytiques).

TODAR [101] et NICKLIN et al [49] signalent que généralement, certaines propriétés physiologiques sont communes à toutes les espèces du genre *Pseudomonas* comme ; la nutrition chimio – organotrophique, le métabolisme en aérobie, absence de fermentation, absence de photosynthèse, incapacité à fixer l'azote et capacité de se développer au dépens d'une grande variété de substrats organiques, ils assimilent le sucre (glucose) par la voie Entner-Doudoroff.

Quelques espèces de *Pseudomonas* peuvent utiliser plus de 150 différents composés organiques comme source unique de carbone et d'énergie, possédant ainsi une remarquable diversité métabolique.

Le groupe des *Pseudomonas* spp fluorescents inclut des espèces importantes pour :

- La biodégradation d'une gamme diversifiée de composés et de sous-produits organiques formé pendant la décomposition de matériaux végétaux et animaux [100, 102, 103].
- La production de métabolites secondaires utiles pour les plantes et de substances importantes du point de vue biotechnologique [100].

Parmi les diverses métabolites secondaires synthétisés par les *Pseudomonas* spp fluorescents, il y a les pigments hydrosolubles diffusant dans les milieux de culture. Ces bactéries ont la capacité de produire deux types de pigments hydrosolubles: des pigments fluorescents : les pyoverdines et des pigments non fluorescents phénaziniques [100, 35, 23, 102].

#### 1.6.1 Aptitudes de la colonisation rhizosphérique

LEMANCEAU [22], BAIS et al [86] et VIAL [46] ont montré que les caractéristiques bactériennes qui conditionnent la bonne compétence rhizosphérique des souches de *Pseudomonas* spp fluorescents sont relativement méconnues, ces caractéristiques semblent liées à l'aptitude des souches à : survivre dans le sol, s'attacher à la racine, se déplacer vers et le long de la racine et entrer en compétition de façon efficace avec la microflore indigène.

L'adhésion des *Pseudomonas* spp fluorescents à la racine dépend plutôt de leur aptitude à s'agglutiner avec des glycoprotéines appelées agglutinines, produites par la plante. Le phénomène d'agglutination est relativement spécifique [22, 1, 15]. (Figure 1.2)

D'après JACQUES et al. [82], d'autres auteurs ont étudié l'importance de la mobilité chez *Pseudomonas* spp fluorescents dans le phénomène du chimiotactisme. Ces mêmes auteurs ont conclu que la mobilité est nécessaire à la

colonisation racinaire, en observant que des mutants de *P. fluorescent* dépourvus de flagelles ne donnent pas de bons résultats de colonisation rhizosphérique.

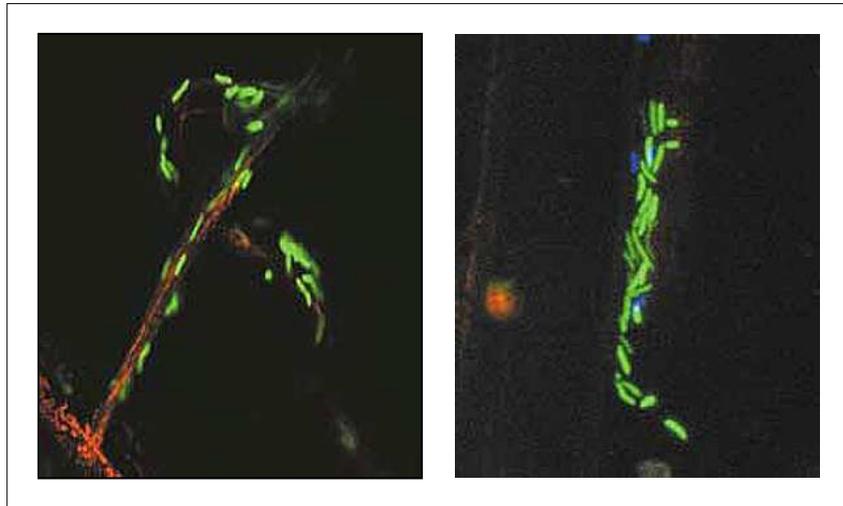


Figure 1.2 : Colonisation des racines de tomate par une souche de *Pseudomonas fluorescens*, et leur attachement au chevelu racinaire après inoculation des semences avec une suspension bactérienne marquée [58]

Enfin une étude a montré l'influence de la plante du maïs et plus précisément des cellules de la coiffe racinaire sur la colonisation des racines par des *Pseudomonas* spp fluorescents [59].

### 1.6.2 Effets des *Pseudomonas* sur les plantes

Plusieurs études ont prouvé que les *Pseudomonas* spp fluorescents améliorent par divers mécanismes la croissance des plantes, la productivité des cultures et réduisent les populations des microorganismes délétères, aussi bien sous des conditions non contrôlées (plein champ) que sous des conditions contrôlées (chambre de culture dans des pots) [35, 106, 23].

Toutefois Les *Pseudomonas* spp fluorescents comme toutes les bactéries vivant dans la rhizosphère renferment des DRB (Deleterious Rhizobacteria). Il est d'ailleurs remarquable de constater que les bactéries délétères et les PGPR se rattachent aux mêmes genres et souvent aux mêmes espèces (*Pseudomonas fluorescens*, *P. putida*, etc.) et sont tour à tour classées dans l'une ou l'autre catégorie. Ces *Pseudomonas* spp délétères sont naturellement présents dans les

cultures répétées de pomme de terre ou artificiellement introduits lors de culture de blé ou de betterave, provoquant des réductions significatives de la croissance des plantes. Cette activité néfaste serait liée à la production de métabolites tels que l'acide cyanhydrique en excès qui perturberait et inhiberait la croissance des plantes [22, 1].

Les espèces de *Pseudomonas* associées avec les plantes sont connues pour utiliser un ou plusieurs systèmes de quorum sensing pour régler de multiples caractères, dont certains affectent leur persistance et viabilité (les mécanismes d'attachement) sur des surfaces de plantes, la production de métabolites secondaires (les antibiotiques, l'activité d'exoprotease). Par exemple, chez certaines souches de *Pseudomonas aureofaciens*, efficaces contre plusieurs maladies du blé, deux systèmes différents de quorum-sensing (PhzR/PhzI et CsaR/CsaI) ont été identifiés [94, 95, 25].

### 1.7 Mode d'action des PGPR

La promotion de la croissance des plantes par les souches PGPR a été attribuée à une multitude de mécanismes. Ces rhizobactéries procurent des effets positifs directs sur la croissance des plantes via des composés synthétisés par la bactérie ou en facilitant le prélèvement de certains éléments nutritifs dans l'environnement rhizosphérique. D'autres auront plutôt des effets phytobénéfiques indirects via l'inhibition (par antagonisme ou compétition) de microorganismes phytopathogènes délétères. Ces effets phytoprotecteurs ont été principalement étudiés chez des PGPR antagonistes du genre *Pseudomonas* [107, 35, 73, 31, 27, 26, 47, 15, 37, 108, 48, 39, 60, 56].

D'après LEMANCEAU [22], KLOEPPER et SCHROTH ont été les premiers à mettre en évidence l'effet bénéfique indirect d'une souche de *Pseudomonas fluorescens* sur la croissance des plantes. Les différents mécanismes, agissant seuls ou en combinaison, avancés pour expliquer comment les *Pseudomonas* fluorescents sont capables de réduire la gravité des maladies des plantes sont sommairement énoncés:

- la simple occupation des sites d'infection potentielle par colonisation de la rhizosphère, empêchent ainsi la croissance d'autres microorganismes dont les pathogènes : c'est la compétition pour l'espace [22, 82, 58].
- La production de métabolites secondaires exercent une activité toxique directe ; antibiose et inhibiteur de la croissance des pathogènes (fongicide, acide cyanhydrique HCN) [22, 82, 58, 109, 23, 110, 59].
- La compétition trophique pour des éléments nécessaires aux agents pathogènes [22, 82, 58, 110, 59].
- La stimulation des réactions de défense de l'hôte vis-à-vis des agents pathogènes ; c'est la résistance systémique induite [22, 82, 10, 58, 111, 23, 39, 59].

La relation entre cette protection et l'augmentation de croissance ou du rendement est très claire car il a été montré que la réduction de la gravité d'une maladie s'accompagne d'une augmentation du rendement de la culture bactérisée [22, 1, 112].

JACQUES et al [82], BLOEMBERG et al [58], ALLAIRE et al [113] et FERNANDO et al [110] signalent que les molécules excrétées par les *Pseudomonads* pour inhiber la croissance des phytopathogènes se classent dans un large éventail d'antibiotiques, incluant la pyrrolnitrine, la pyolutéorine, les dérivés de la phénazine, le 2-4 diacétylphloroglucinol ou l'oomycine A. D'autres métabolites toxiques sont également produits par les *Pseudomonas* fluorescents ; il s'agit d'enzymes mycolytiques, de l'acide cyanhydrique ou de l'ammoniaque.

La compétition trophique s'opère en particulier pour le fer, élément indispensable aux métabolismes des microorganismes aérobies. Elle est réalisée par la production de sidérophores pyoverdines qui, en conditions de carence en fer, pourrait rendre l'ion ferrique inaccessible aux autres microorganismes [82, 114, 23, 115].

### 1.7.1 Effet direct sur la croissance des plantes

D'après plusieurs auteurs les moyens avec lesquels les PGPR améliorent la croissance et le développement des plantes hôtes peuvent être classés en six catégories : [35, 73, 31, 47, 15, 37, 108, 48, 56]

- augmentation de la disponibilité des éléments nutritifs dans la rhizosphère,
- fixation biologique de l'azote atmosphérique N<sub>2</sub>,
- induction des augmentations du volume racinaire,
- production de phytohormones,
- combinaison de ces modes d'action,
- favorisation des actions symbiotiques bénéfiques d'autres bactéries avec les plantes hôtes,

RYU et al [27] ont montré que plusieurs changements chimiques dans le sol sont associés aux PGPR. Certaines souches bactériennes stimulent directement la physiologie des plantes par la sécrétion de substances analogues aux hormones produites par ces dernières, alors que d'autres augmentent la disponibilité des éléments minéraux dans le sol.

DI BATTISTA-LEBOEUF et al [61], LATOUR et al [23], SHARMAA et al [26] et HUMPHRIS et al [59] signalent que la promotion de la croissance des plantes par *Pseudomonas* spp fluorescents est également attribuée à des mécanismes variés comme les métabolites secondaires affectant la physiologie des plantes, en mettant à leur disposition des éléments indispensables pour leur croissance. D'autres souches spécifiques de *Pseudomonas* spp. sont capables d'augmenter significativement le rendement des cultures par la soustraction des effets néfastes des microorganismes pathogènes.

#### 1.7.1.1 PGPR augmentant la disponibilité des éléments nutritifs dans la rhizosphère

VESSEY [15] et SHENG [20] affirment que le mode d'action de plusieurs PGPR se produit par l'augmentation de la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes dans la rhizosphère. La méthode par laquelle ces augmentations ont lieu implique la solubilisation de 576 formes de nutriments non disponibles (insolubles) et/ou la production de siderophores ce qui facilite l'absorption par la

plante de certains nutriments (notamment le fer ferrique). Ainsi les PGPR sont considérés comme des éléments principaux pour l'établissement des plantes sous des conditions de déséquilibre nutritionnel.

#### 1.7.1.1.1 PGPR Solubilisant les phosphates

Le phosphore est l'un des éléments nutritifs essentiels pour la plante composant près de 0.2% de son poids sec. Après l'azote, il est le deuxième macroélément, en importance pour la nutrition végétale, le plus limitant pour la croissance des plantes [116, 15, 117, 118]. D'après IGUAL et al [119], BABANA [73], DAS et al [116] et VESSEY [15], Le phosphore joue un rôle essentiel dans la photosynthèse, le transfert d'énergie nécessaire à la croissance et l'amélioration de la productivité des plantes. Il influence également le développement racinaire, la maturation et la formation de graines et nombreuses autres fonctions de la plante.

Bien que, les sols peuvent contenir des réserves importantes de phosphates, les formes solubles (les ions monobasiques ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) et les ions dia basiques ( $\text{HPO}_4^{2-}$ )) assimilables par les plantes sont le plus souvent très faibles par rapport à la proportion totale [119, 15, 106, 117, 120]. Dans les sols, son contenu varie de 200 à 5000 ppm soit 0,02 à 0,5% pour une moyenne de 600 ppm. La majorité des sols cultivables en sont pauvres. Pour améliorer la production des plantes, on apporte le phosphore sous forme d'engrais soluble [119, 121, 6, 73].

La solubilisation du phosphore dans la rhizosphère est le mode le plus commun des actions employées par les PGPR. Quelques exemples des associations récemment étudiées incluent *Pseudomonas chlororaphis* et *P. putida* avec le soja (1999) *Azotobacter chroococcum* avec le blé (1999), *Bacillus circulans* et *Cladosporium herbarum* avec le blé (1999), *Bacillus* sp. avec de nombreuses espèces cultivées (1998), *Enterobacter agglomerans* avec la tomate (1998) , *Rhizobium* sp. et *Bradyrhizobium japonicum* avec le radis (1998), et *Rhizobium leguminosarum* bv. *Phaseoli* avec le maïs (1998) [1, 119, 122, 15, 116, 73, 27, 83, 117].

Des souches appartenant aux genres *Pseudomonas* sont parmi les solubilisateurs de phosphate les plus performants. [123]. PIETR et al [124] signalent que la libération du phosphate disponible dans la roche du phosphate naturel a été suggérée comme un mécanisme des rhizobactéries phyto-bénéfiques PGPR par GERRETSON en 1948. Depuis cette date un travail consistant dans ce domaine a été effectué.

D'autres chercheurs suggèrent que l'amélioration de l'absorption des phosphores par la plante grâce à l'activité de ces rhizobactéries serait liée à la modification de la croissance et de la longévité du système racinaire [73].

Selon VESSEY [15], les bactéries solubilisant les phosphates sont communes dans la rhizosphère. L'amélioration de l'alimentation minérale de la plante en phosphore a été la première hypothèse proposée pour expliquer l'effet bénéfique enregistré à la suite de la bactérisation de plantes par *Pseudomonas* spp fluorescents. Les souches de cette bactérie augmenteraient la concentration en phosphore soluble soit par minéralisation des phosphates organiques, grâce à des phosphatases, soit par solubilisation des phosphates inorganiques sous l'effet d'acides organiques. En effet plusieurs auteurs signalent que le principal mécanisme de solubilisation du phosphate minéral est la production d'acides organiques [22, 15, 123].

#### 1.7.1.1.2 PGPR solubilisant le potassium

Le potassium intervient dans des processus physiologique importants pour les plantes : photosynthèse, fructification, perméabilité cellulaire, équilibres ioniques, etc. Avec le développement rapide de l'agriculture moderne, la disponibilité du potassium dans le sol a diminué en raison des prélèvements des cultures, du lessivage, du ruissellement et de l'érosion [125, 20].

SHENG [20], signalent qu'il devient ainsi urgent d'étudier la bioactivation des réserves du sol en potassium par l'utilisation des PGPR, solubilisant le potassium, afin d'atténuer le manque en cet élément. Certains PGPR peuvent solubiliser les formes non disponibles du potassium comme les Micas, Feldspaths, Illites et Orthoclases, en excréant les acides organiques qui dissolvent directement la roche potassique ou chélatent les ions de silicium. Par conséquent,

l'application des microorganismes solubilisant le potassium est une approche prometteuse pour augmenter la disponibilité de potassium dans les sols enrichis par ces bactéries [126, 20].

#### 1.7.1.1.3 PGPR facilitant l'absorption du fer

Le fer est un élément nutritif essentiel pour les plantes, mais il est relativement insoluble dans la solution du sol. Les racines des plantes préfèrent absorber le fer dans la forme la plus réduite des ions ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ), mais l'ion ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ) est le plus commun dans les sol bien aéré bien qu'il soit rapidement précipité sous des formes d'oxyde de fer [15].

LEMANCEAU [22] signale que même s'il constitue le 4<sup>e</sup> élément de l'écorce terrestre, le fer est peu soluble et donc peu disponible dans les sols cultivés. En effet, dans les sols normalement aérés, le fer est surtout oxydé ( $\text{Fe}^{+++}$ ). Aux valeur de pH compatibles avec les cultures, le fer  $\text{Fe}^{+++}$  se présente essentiellement sous forme d'hydroxyde ferrique  $\text{Fe}(\text{OH})^3$  peu soluble.

D'après SHARMAA et al [26], le fer est un cofacteur pour plus de 140 enzymes qui catalysent des réactions biochimiques pour le métabolisme des végétaux. Par conséquent, le fer remplit plusieurs rôles essentiels dans la croissance et le développement des plantes, y compris la synthèse de chlorophylle, la synthèse de thylacoïdes et le développement de chloroplaste.

L'insuffisance du fer résulte en une chlorose est prédominante dans environ 30% des cultures dans le monde entier. Dans la nature, le fer est présent en abondance sous diverses formes selon leur solubilité et leur biodisponibilité mais il reste généralement peu disponible aux plantes [1, 26]. Pour acquérir cet élément indispensable mais peu soluble les bactéries ont développé une stratégie d'acquisition du fer qui repose sur la synthèse de sidérophores et de protéines membranaires réceptrices qui se lient au  $\text{Fe}^{3+}$  et le maintiennent en solution. Les mutants déficients en synthèse de sidérophores (Sid-) étaient significativement plus sensibles à la privation du fer que les souches de type sauvage [22, 49, 23, 83].

Les sidérophores sont des métabolites de faible poids moléculaire qui présentent une spécificité et une forte affinité pour l'ion ferrique  $Fe^{+3}$ , ils jouent un rôle physiologique important, ce sont de puissants chélateurs de fer et des agents d'assemblage de complexe à base d'ions de fer. La synthèse de ces molécules dépend de la concentration en ions  $Fe^{+2}$ , ainsi dans les milieux carencés en fer leur production est abondante [82, 111, 99, 83, 26, 115].

Les *Pseudomonas* spp fluorescents produisent des sidérophores appelés pyoverdine ou pseudobactine qui forme avec le fer un complexe appelé ferripyoverdine ou ferripseudobactine. Les pyoverdines sont des pigments caractéristiques jaune vert, solubles dans l'eau et insolubles dans le chloroforme, ils peuvent être aisément identifiés par la forte fluorescence visualisée sous la lumière ultra violet bleu [99, 100, 102]. Le fer chélaté peut être utilisé par les plantes, ainsi les pseudobactine peuvent influencer directement l'alimentation de la plante en fer. Des auteurs ont montré que la tomate n'absorbe le fer de façon efficace que si elle est cultivée en présence de ces rhizobactéries [127, 22, 26].

Les résultats obtenus par SEONG et al [127] ont confirmé que la production active de pyoverdines dans l'environnement des racines (rhizosphère) est une nécessité à la stimulation de la croissance des plantes par les souches des *Pseudomonas* spp fluorescents.

Selon DAVET [1] et VESSEY [15] il a été démontré que de nombreuses espèces végétales peuvent absorber le complexe bactérien  $Fe^{3+}$  - siderophores, synthétisés par les rhizosphères.

#### 1.7.1.2 PGPR fixateur de l'azote

L'intérêt de ces rhizobactéries bénéfiques fixatrices d'azote stimulatrices de la croissance des plantes a augmenté récemment du fait de leur potentiel comme biofertilisants [83, 16].

Les bactéries fixatrices d'azote se répartissent ainsi en deux catégories. La première catégorie inclut les bactéries formant des nodules racinaires et vivant en symbiose avec les racines, alors que la deuxième renferme des bactéries fixatrices d'azote qui vivent en association avec les racines (dans

l'exorhizosphère, sur le rhizoplan ou dans l'endorhizosphère) sans toutefois engendrer des modifications de la morphologie racinaire (formation de nodules) [83].

DAVET [1] précise que l'azote est un des principaux facteurs limitants de la production végétale et la consommation mondiale d'engrais azotés ne cesse de croître. L'exploitation et le développement des voies biologiques de la fixation de l'azote représentent donc un enjeu considérable.

Selon LEMANCEAU [22] plusieurs auteurs ont réussi à isolé de la rhizosphère des *Pseudomonas* spp fluorescents fixateurs d'azote. Cependant leur rôle positif sur les plantes n'a pas pu être démontré.

Le PGPR le plus étudié et le plus longtemps exploité pour ses capacités à fixer l'azote ( $N_2$ ) pour leurs hôtes de légumineuse est le rhizobium (incluant le *Allorhizobium*, *Azorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Rhizobium*, et *Sinorhizobium*). Il est évident que de nombreux PGPR ont la capacité de fixer  $N_2$ , mais rares sont leurs modes d'action pour la stimulation de la croissance des plantes créditées aux bactéries fixatrices d'azote [128, 15, 83].

#### 1.7.1.3 Effets positifs sur la croissance et la morphologie des racines

D'après VESSEY [15] l'étude de BARBER et CUSHMAN (1981) portant sur l'utilisation d'un modèle mathématique mécanistique pour prévoir le prélèvement nutritif des plantes, a indiqué qu'en dépit des 577 gammes des éléments nutritifs solubles et disponibles dans le sol, les PGPR qui affectent la morphologie des racines peuvent avoir une influence très importante sur le potentiel du prélèvement des éléments nutritifs.

Ainsi BERTRAND [129], VESSEY [15] et TOURAINÉ [37] ont classé la réponse à l'effet stimulateur de certaines souches de PGPR sur les racines en plusieurs parties :

- Une morphogénèse racinaire qui concerne l'architecture des racines : un développement des racines latérales stimulé.

- Un élargissement de la surface occupée par les racines avec un nombre et une longueur plus élevés des racines latérales.
- Une morphogenèse des poils racinaires : une augmentation de leur densité et de leur taille.
- Une augmentation du poids des racines.

#### 1.7.1.4 Production de phytohormones

Un des mécanismes proposés pour expliquer la stimulation de la croissance des plantes par les rhizobactéries PGPR passe par la production de régulateurs de la croissance végétale. Ainsi La plupart des régulateurs de croissance connus chez les végétaux supérieurs, peuvent être synthétisés par un grand nombre de bactéries rhizosphériques [1, 130, 27, 83].

La production de substances de croissance par *Pseudomonas* spp fluorescents a été fréquemment mise en évidence *in vitro*. Ces substances peuvent être absorbées par les racines [22]. Selon VESSEY [15] et LEMANCEAU [22] différents auteurs ont mis en relation *in vitro*, l'aptitude de quelques souches de *Pseudomonas* spp fluorescents à produire des substances de croissance et à modifier la morphologie des plantes de manière analogue aux substances de croissance synthétisées par les plantes. Ils en conclurent que la stimulation de croissance des plantes bactérisées est due à la synthèse microbienne de substances de croissance.

L'acide Indole-3-acétique (AIA) ou auxine est une phytohormone qui est connue pour être impliqué dans l'initiation racinaire, la division cellulaire, et l'allongement des cellules. Cette hormone est très souvent produite par les PGPR. En général, les PGPR produisant l'AIA peuvent augmenter la croissance et la longueur des racines, résultant en une surface racinaire plus importante qui permet aux plantes d'accéder à une quantité plus élevée d'éléments nutritifs au niveau du sol. Ainsi, plusieurs auteurs signalent que des auxines produites par des rhizobactéries pouvaient être assimilées par différentes plantes (maïs, pois, concombre) [22, 83, 15].

DE SALAMONE et al [130], GOBAT et al [83] et VESSEY [15] ajoutent que la production d'autres phytohormones par les PGPR a effet phytostimulateur a été

identifiée, mais pas avec la même envergure que les bactéries productrices d'auxines (AIA). Les Cytokinines sont une classe de phytohormone, connus pour favoriser la division cellulaire, l'élongation cellulaires, et le développement des tissus dans certaines parties de la plante.

L'éthylène est la seule phytohormone qui se trouve à l'état gazeux. Il est connu également en tant qu'hormone de blessure parce que sa production dans la plante peut être induite par une perturbation physique ou chimique des tissus végétaux. Parmi sa myriade d'effets sur la croissance et le développement des plantes, la production d'éthylène peut causer une inhibition de la croissance des racines. Plusieurs auteurs ont proposé la théorie que le mode d'action de certains PGPR était la production de 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) déaminase, une enzyme qui pourrait dissoudre l'ACC, le précurseur immédiat dans la voie biosynthétique de l'éthylène dans les plantes. Ils ont avancé que l'activité de l'ACC déaminase diminuerait la production d'éthylène dans les racines des plantes hôtes et résultant en une élongation de leurs racines [131, 132, 133, 112].

VESSEY [15] signale que les découvertes les plus récentes de la participation des PGPR produisant des cytokinines, ACC deaminase, et probablement des acides gibberelliques ouvrent la possibilité que d'autres substances de régulation de la croissance des plantes peuvent être impliquées dans la promotion de la croissance des plantes par les PGPR.

#### 1.7.1.5 Combinaisons des modes d'action

Généralement seuls des modes d'action simple des PGPR sont présentés. Cependant dans beaucoup de cas (probablement la plupart des cas) un PGPR unique montrera plusieurs modes d'action complémentaires et combinés pour son efficacité. De même, l'isolement des bactéries à partir de rhizosphères révélera souvent de multiples modes d'action des populations des PGPR habitant la rhizosphère [15, 40].

CATTELAN et al [134] ont montré dans plusieurs études que les PGPR auront souvent de multiples modes d'action. Ils ont également déduit de cette

étude que la co-existence des PGPR dans la rhizosphère qui ont le même mode d'action, peuvent agir synergiquement pour stimuler la croissance des plantes hôtes. BABANA [73] affirme dans son étude que la stimulation de la germination des graines et de la croissance du blé n'est pas due à un mode d'action simple, mais à une combinaison de mécanismes : sécrétion des phytohormones qui favorisent la colonisation des racines par les champignons mycorhiziens, amélioration de la nutrition minérale par solubilisation du Phosphore.

#### 1.7.1.6 Bactéries 'Helper'

VESSEY [15] signale qu'il n'est pas rare de voir les effets bénéfiques de PGPR augmentés par l'intermédiaire de synergie de l'action de microorganismes rhizosphériques tiers. Dans ces cas, les PGPR favorisant les autres relations microorganismes - plantes hôtes sont considérés comme des bactéries 'helper'. La majorité des études recherchant des PGPR helper ont montré qu'ils sont impliqués soit dans les symbioses légumineuse-rhizobium ou les symbioses plantes-champignons.

##### - Stimulation des symbioses légumineuses–rhizobium :

Les PGPR helper favorisant les aspects de la symbiose légumineuse–rhizobium est le plus commun de ces types de rapports. Il a été mis en évidence de nombreux modes d'action des PGPR pour la stimulation des symbioses légumineuse– rhizobium. La stimulation de nodulation est le plus généralement un effet indirect; le PGPR stimule la croissance de racine, ce qui fournit plus de sites pour l'infection et de la nodulation [135, 15].

##### - Stimulation des symbioses plantes- champignons :

Bien que l'action des PGPR est souvent un effet d'antagonisme sur les pathogènes fongiques des plantes, les PGPR helper augmentent parfois la croissance des plantes indirectement en stimulant la relation entre la plante hôte et les champignons rhizosphériques bénéfiques comme les mycorhizes arbusculaires [15].

Certaines bactéries rhizosphériques sont connues pour leur capacité à produire des substances favorisant la croissance des plantes plus particulièrement

lorsqu'elles sont associées aux champignons mycorhiziens à vésicules et arbuscules [73].

### 1.8 Utilisation pratique des rhizobactéries bénéfiques PGPR

En termes d'application biotechnologique, l'exploitation de ces microorganismes bénéfiques reste conditionnée par la viabilité potentielle des inoculums bactériens. L'objectif étant la mise au point d'inoculums composés de microorganismes sélectionnés afin de minimiser l'application de fertilisants chimiques et maximiser la croissance et la nutrition des plantes. Les orientations s'intéressent aussi à l'élaboration des inoculums composés de plusieurs agents microbiens, dont l'effet positif recherché résulte des effets cumulatifs de ces microorganismes [58, 54, 73].

RYU et al., [27], BASHAN et al., [108] rapportent que les bactéries PGPR ont été appliquées à une large gamme d'espèces agricoles dans le but de stimuler la croissance, incluant l'augmentation du taux de germination des graines, du poids des plantes, des rendements des cultures, et du contrôle des maladies. Plusieurs auteurs ont prouvé que le rendement de plusieurs cultures agricoles augmente entre 10% à 20% avec des applications de PGPR.

A titre d'exemple la société Philom Bios exerçant dans l'Ouest du Canada a vu ses ventes de biofertilisants passer de 3,61 millions de dollars en 1997 à 8,68 millions de dollars en 2001. L'entreprise estime qu'en employant son inoculant rhizobactérien fixateur de phosphate, comme biofertilisants, les agriculteurs peuvent tirer un profit additionnel de 20 \$/ha. Selon le fabricant, les inoculums combinés peuvent représenter une hausse de profit de 33.60 \$/ha pour les producteurs de lentilles et de pois. L'avantage global pour l'économie de l'Ouest canadien était évalué à 26 millions de dollars en 2001. La société prévoit d'étendre son marché aux plaines du Nord des États-Unis [6].

La sélection des PGPR efficaces est l'aspect le plus critique pour avoir plus d'avantages de cette technologie. Les chercheurs emploient différentes approches pour le criblage et la sélection efficace des rhizobactéries bénéfiques dans des conditions gnotobiotiques ; production *in vitro* des régulateurs de croissance de plantes et de substances biologiquement actives. Cependant, l'utilisation

combinée de deux ou plusieurs approches pour la sélection des rhizobactéries peut être plus utile pour choisir efficacement les PGPR pour les applications pratiques dans l'agriculture [1, 28].

Dans le cadre d'une utilisation pratique de *Pseudomonas* spp fluorescents, il est nécessaire de sélectionner les souches les plus efficaces. Cette efficacité repose sur la synthèse de métabolites particuliers (sidérophores, antibiotiques, substances de croissance, etc.) et sur la bonne colonisation racinaires. Ces souches doivent de plus, être introduites dans des sols qui présentent des caractéristiques physico-chimiques et biologiques favorables à l'expression des activités bactériennes intéressantes [93, 22, 36].

Une stimulation de la croissance des plantes et une augmentation du potentiel naturel de résistance aux agents pathogènes, à l'aide des rhizobactéries bénéfiques (PGPR), concilie l'agriculture durable et la protection de l'environnement. Pour que cet effet bénéfique soit effectif, il doit être encore plus performant en terme de persistance dans le temps [93, 10, 36, 20, 13].

MAGUNR [6] et TOURAINE [37] signalent que la formulation de produits à base de bactéries bénéfiques à des fins agricoles est actuellement un secteur, certes avec peu d'importance, mais en plein développement. Les effets multiplicateurs en termes d'avantages pour les agriculteurs sont immenses.

### 1.8.1 Les différentes préparations à base de PGPR

Différentes préparations à base de bactéries (inoculum bactérien avec un porteur approprié) appelées biofertilisants, phytostimulants, et biopesticides, sont disponibles dans le commerce [58, 54].

#### 1.8.1.1 Phytostimulants

Les phytostimulants peuvent favoriser directement la croissance des plantes, souvent par la production de phytohormones ; d'auxines, de cytokinines et de gibbérellines [58].

### 1.8.1.2 Biofertilisants

Le biofertilisant est défini comme une substance composée de microorganismes vivants, entre autre des rhizobactéries, qui une fois appliqués aux semences, sur les surfaces de plantes, ou dans le sol, colonisent la rhizosphère ou l'intérieur du végétal, améliorent la croissance et la morphologie des racines en augmentant l'approvisionnement et la disponibilité des éléments nutritifs primaires (N, P, K, Fe) aux plantes hôtes, en synthétisant des substances de régulation de la croissance des plantes et/ou en favorisant d'autres symbioses bénéfiques entre plante et microorganismes (bactéries helper) [58, 54, 15].

Selon OKON [136] ces organismes rhizosphériques améliorent l'utilisation des éléments nutritifs du sol, mais ne les remplace pas comme les engrais chimiques.

Les PGPR ne sont pas tous considérés comme des biofertilisants, les bactéries qui favorisent la croissance des plantes par le contrôle d'organismes délétères sont des biopesticides. Cependant certains PGPR semblent favoriser la croissance en agissant en tant que biofertilisants et biopesticides simultanément [15].

### 1.8.1.3 Biopesticides

Par analogie aux pesticides chimiques, on appelle biopesticides des agents biologiques utilisés pour lutter contre des organismes pathogènes. Contrairement aux pesticides chimiques qui bouleversent les équilibres naturels, les biopesticides ont au contraire pour but de rétablir, en faveur de la plante, des équilibres rompus par les pratiques culturales [1, 54, 137].

SPADARO et al [13] signalent que ces agents de biocontrôle pour les plantes peuvent être combinés avec d'autres produits chimiques, avec des méthodes physiques (solarisation ou stérilisation avec des produits chimiques ou avec la chaleur) ou avec des pratiques agricoles (le choix des plantes cultivées, rotations de cultures, amendements du sol, la réalisation correcte du labour) pour une amélioration du pouvoir suppressif du sol. Selon la même source, l'utilisation combinée des agents de biocontrôle et de pesticides chimiques a attiré beaucoup d'attention afin d'obtenir des effets synergiques ou additifs envers les

organismes cibles. La quantité réduite du fongicide employée peut stresser et affaiblir l'agent pathogène et rendre ses propagules plus sensibles à l'attaque des antagonistes. Ce ci peut avoir comme conséquence un meilleur contrôle des maladies des plantes. Les agents de biocontrôle doivent ainsi être résistants aux produits chimiques utilisés.

Des *Pseudomonas* spp ont été exploités commercialement pour la protection des plantes par induction de résistance systémique (ISR) contre différentes maladies. L'application de certaines souches de *Pseudomonas* spp. ont protégé les plantes systématiquement contre le dessèchement causé par *Fusarium oxysporum*, *F. Dianthi* [138, 111, 58].

L'association de plusieurs rhizobactéries est nécessaire pour contrôler différentes maladies affectant la même culture. La plupart des agents de biocontrôle sont spécifiques pour un type donné de pathogène cible. Bien que cette propriété représente un avantage du point de vue environnemental, elle crée de grandes difficultés aux cultivateurs qui ont besoin de contrôler plusieurs agents pathogènes dans la même culture [111, 13, 48].

### 1.8.2 Exemples d'inoculums bactériens commercialisés

Actuellement, il existe une gamme de produits à base d'inoculums bactériens qui sont commercialisés avec succès [54].

L'agence de la protection environnementale (The US environmental protection agency : EPA) a publié une liste de biopesticides et de biofertilisants dont la matière active est représentée par des souches de *Pseudomonas*, commercialisés depuis des années par plusieurs firmes : [139]

- *Pseudomonas fluorescens* A506 (006438); *Pseudomonas fluorescens* 1629RS (006439); *Pseudomonas syringae* 742RS (006411) utilisé contre la gelée sur plusieurs cultures et produits par Frost Technology Corporation, Plant Health Technologies.
- *Pseudomonas aureofaciens* Strain Tx-1 (006473) utilisé pour contrôler de nombreuses maladies fongiques et produits par EcoSoil Systems, Inc.

- *Pseudomonas chlororaphis* strain 63-28 (006478) pour contrôler de nombreuses maladies fongiques attaquant les racines de plantes ornementales et maraichères sous serre, produits par EcoSoil Systems, Inc.
- *Pseudomonas syringae* strain ESC-10 (006441) *Pseudomonas syringae* strain ESC-11 (006451), sont utilisés pour prévenir différentes maladies fongiques qui apparaissent après la récolte de fruits de différentes espèces de Rosacées et de *Citrus*. Le producteur est EcoScience Produce Systems Division.

INDIA MART a également publié une liste de producteurs et d'exportateurs de biopesticides ou biofertilisants à base de *Pseudomonas* : [140]

- Vishal Biotechnologies biopesticides *Pseudomonas fluorescens*.
- Rajshree Sugars & Chemicals Limited.
- Bio Agro Ferticons bio-fertilizers, bio-pesticides, *Pseudomonas fluorescens*.
- Nikita Agro Industries biopesticides *Pseudomonas fluorescens*.
- Green Earth Biotech Limited bio control agents, biofertilizers, growth promoters.
- Greens Pesticides Labs biopesticides pseudomonas.

EMD Crop BioScience est une société développant et commercialisant des formulations bactériennes qui améliorent la croissance et le développement des plantes, par exemple Soil Implant est l'inoculum de *Rhizobium leguminosarum biovar viceaeen* formulé en grain à appliquer sur les semences ou plants de lentilles et de pois [141].

## CHAPITRE 2 MATERIELS ET METHODES

### 2.1 Souches bactériennes

Dans nos expérimentations, nous avons utilisé cinq souches bactériennes de *Pseudomonas fluorescens* (Tableau 2.1). Ces souches proviennent d'isolements à partir de différentes rhizosphères. Le choix s'est basé d'une part sur leurs performances, enregistrées dans des travaux précédents, et d'autre part pour leur mise à l'épreuve dans des conditions agronomiques pratiques.

Tableau 2.1: Origines des souches bactériennes de *Pseudomonas fluorescens*

<b>Souches</b>	<b>Plantes hôtes</b>	<b>Origine géographique</b>	<b>Références</b>
<b>CHAO</b>	Rhizosphère du tabac	Suisse	Laboratoire de biologie microbienne ; Université Lausanne, Suisse [142].
<b>C7R12</b>	Rhizosphère de la tomate	France	UMR- MGC, INRA Dijon ; Université Bourgogne, France [22].
<b>P64</b>	Rhizosphère de l'abricotier	Mitidja (Algérie)	Laboratoire de phytopathologie ; Université Blida ; Algérie [147].
<b>S20</b>	Rhizosphère du palmier dattier	Ghardaïa (Algérie)	Laboratoire de phytopathologie ; Université Blida ; Algérie [154].
<b>CK4 (Mutant)</b>	Rhizosphère du tabac	Suisse	Laboratoire de biologie microbienne ; Université de Lausanne, Suisse [142].

Les souches CHAO, C7R12 sont des souches performantes de référence. La souche CHAO a été utilisée dans plusieurs études de contrôle de nombreuses maladies des plantes et de la sécrétion des sidérophores [142, 133, 38, 143, 144]. La souche C7R12 a été choisie comme modèle bactérien dans plusieurs études en raison de son efficacité en lutte biologique, sa bonne survie dans la rhizosphère, sa forte aptitude à mobiliser le fer et sa capacité à assimiler les oxydes d'azote [22, 145, 146, 38].

Les souches P64 [147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154], S20 [154, 38, 143] sont des souches locales. La souche CK4 [142] est une souche CHAO mutante déficiente en pyoverdine Pvd<sup>-</sup>.

A partir de souches conservées au froid (-18°C) sur un milieu B de King (KB) dans des boîtes de Pétri, nous avons réalisé des repiquages de réactivations sur le milieu KB [155] (Appendice A). La vérification de la pureté des cinq souches a été réalisée à travers de nombreux repiquages successifs (8 à 10 repiquages) sur le même milieu de culture par épuisement sectoriel.

## 2.2 Description du site d'expérimentation

Les essais ont été réalisés dans la station expérimentale de l'institut technique des cultures maraîchères et industrielles (ITCMI) de Staouéli (Alger), dans les conditions pratiques de production de tomate et de pomme de terre. Cette structure a mis à notre disposition :

- Pour la culture de tomate : une serre plastique de 400 m<sup>2</sup>.
- Pour la culture de pomme de terre : un terrain de 3000 m<sup>2</sup>.

### 2.2.1 Caractéristiques de la serre de tomate

C'est une serre plastique tunnel (type CASSDEP) à ossature métallique en fer galvanisé et à couverture souple en polyéthylène stabilisé de deux ans et de couleur jaune. Le film plastique a une largeur de 4.40 m et une épaisseur de 180µ (UV + IR). L'orientation de la serre est Est – Ouest.

La serre couvre une surface de 364,8 m<sup>2</sup> soit 45,6 m de longueur sur 8 m de largeur, comporte sept lignes de plantation, elle est divisée en quatre blocs dont chacun possède son propre système d'irrigation de goutte à goutte. La station de tête du système d'irrigation est localisée à l'entrée de la serre.

Les précédents culturaux de la serre de tomate des trois dernières compagnes agricoles :

- 1<sup>ère</sup> année compagne agricole 2002 - 2003 : poivron + labour, solarisation en été ; retrait du plastique de la serre.
- 2<sup>ème</sup> année compagne agricole 2003 - 2004 : poivron + labour.

- 3<sup>ème</sup> année campagne agricole 2004 - 2005 : tomate + labour.

#### 2.2.1.1 Préparation de la serre plastique

Des travaux culturels et d'entretien ont été effectués dans la serre, avant la réception des plants de tomate :

- Désherbage manuel total et un épandage d'insecticide (1 mois avant le repiquage) MOCAPE en granulés à raison de 3 kg par serre.
- Travail du sol : un labour est réalisé par une charrue à socs à 30 cm, suivi d'un passage du cover crop (disquage).
- Un nivelage manuel est effectué avec des râteliers à dents.
- L'installation du système d'irrigation de goutte à goutte suivant le dispositif expérimental adopté.
- Le rayonnage ; Les trous de plantation sont confectionnés le jour de la transplantation avec une densité de plantation de 0,40 m (entre les plants) x 1 m (entre les lignes).

Il est à noter, pour les besoins de notre expérimentation, qu'aucune fertilisation minérale ou organique n'a été apportée au sol dans cette serre et ceci pour soustraire ses effets des actions des bactéries appliquées.

#### 2.2.2 Caractéristiques du terrain de pomme de terre

C'est un terrain plat s'étend sur une superficie de 2220 m<sup>2</sup> : 55,5 m de longueur sur 40 m de largeur. Le terrain est divisé en deux parties dont chacune renferme quatre parcelles qui constituent les blocs des deux essais ; Essai 1 : avec fertilisation minérale et Essai 2 : sans fertilisation minérale. Ces blocs sont munis d'un système d'irrigation en goutte à goutte indépendant et relié à la station de tête du terrain. L'orientation du terrain est Nord – Sud.

Les précédents culturels du terrain de pomme de terre établis sur trois campagnes agricoles sont notés :

- 1<sup>ère</sup> année campagne agricole 2002 - 2003 : culture d'haricot.
- 2<sup>ème</sup> année campagne agricole 2003 - 2004 : culture d'haricot + arachides.
- 3<sup>ème</sup> année campagne agricole 2004 - 2005 : pomme de terre et haricot en culture intercalaire.

### 2.2.2.1 Préparation du terrain de plantation

Le travail du sol représente le point de départ de la culture de pomme de terre, et sa bonne réalisation conditionne la réussite de toutes les actions ultérieures. Il doit être correctement réalisé avant de recevoir les tubercules de pomme de terre ; le sol doit être exemptes de mottes et ameubli uniformément sur une profondeur de 18 à 20 cm, afin de permettre un développement convenable des racines et un grossissement régulier des tubercules [156]. Le terrain a bénéficié donc des travaux culturaux suivants:

- Un labour ; il a été réalisé avec une charrue à socs à une profondeur de 30 cm.
- Un passage croisé du cover crop pour émietter toutes les mottes.
- Le terrain est caractérisé par une multiplication importante des mauvaises herbes surtout le chiendent *Agropyron repens*, donc plusieurs désherbages manuels sont réalisés pendant plusieurs semaines.
- Un hersage et un nivelage pour préparer le lit de semence constitué d'une couche fine de plantation de 10 cm environ.
- l'installation du système d'irrigation de goutte à goutte est réalisée. Cette installation est utilisée dans notre expérimentation comme une bordure séparant complètement chaque bloc.

### 2.2.3 Système d'irrigation

Au niveau de la serre de tomate et du terrain de pomme de terre, l'irrigation est réalisée par le système de goutte à goutte. Ce système nous a orienté dans la mise en place de nos essais. Les surfaces des deux essais de tomate et de pomme de terre (essai 1 et essai 2) sont divisées en quatre (04) blocs. L'irrigation est autonome au niveau des blocs, ainsi chaque bloc a ses propres canalisations principales, secondaires et une vanne secondaire d'ouverture. Les canalisations des blocs sont reliées à une station de tête (pompe principale) et une vanne principale, le débit des goutteurs est de 2 l/h.

Ce système d'irrigation nous a permis de séparer les 4 blocs de chaque dispositif expérimental sans aucun risque de contact entre les différents traitements. Les canalisations principales au niveau de chaque bloc sont considérées comme des bordures.

#### 2.2.4 Analyse du sol

Des échantillons du sol ont été prélevés des terrains de la culture de pomme de terre et de la serre de tomate pour effectuer des analyses pédologiques. L'échantillonnage est réalisé à plusieurs emplacements sur dix points de prélèvement répartis sur la totalité de chaque terrain. De chaque point une quantité de 200 g environ est prélevée, ces quantités sont ensuite convenablement mélangées dans le même sac en un seul échantillon homogène et représentatif. C'est à partir de cet unique échantillon qu'on prélèvera les prises d'essai pour les différentes analyses.

Le séchage des échantillons a été réalisé dans une salle aérée. Après plusieurs semaines il est broyé à l'aide d'un mortier et tamisé à 2 mm. Les analyses ont été effectuées au niveau du laboratoire de pédologie du département des sciences agronomiques de l'université de BLIDA et de l'institut technique de l'arboriculture fruitière (ITAF) à Tessala El Merdja (Alger). (Appendice B)

Les analyses pédologiques effectuées sont :

- Dosage de la matière organique [157].
- Dosage du calcaire total [158].
- Détermination du pH [159].
- Détermination de la conductivité électrique [160].
- Détermination de la granulométrie [161].
- Détermination de l'humidité [162].
- Dosage du phosphore assimilable [163, 164, 165].
- Dosage du potassium échangeable [166, 167].

#### 2.2.5 Analyses de l'eau

L'eau d'irrigation provient d'un puits, ce dernier alimente les canalisations d'irrigation du champ de pomme de terre et de la serre de tomate. Le prélèvement des échantillons de l'eau pour l'analyse est réalisé au niveau de ce puits. Les analyses ont été effectuées à l'agence nationale des ressources hydrauliques ANRH de Blida, concernant plusieurs éléments minéraux. (Appendice C).

### 2.2.6 Données météorologiques

Un relevé complet des principaux événements climatiques a été réalisé au niveau du terrain de pomme de terre et de la serre de tomate, par la station météorologique de l'ITCMI de Staouéli : (Appendice D)

Plein champ ; culture de pomme de terre :

- Température de l'air.
- Humidité.
- Vent.
- Evapotranspiration.
- Précipitations.

Sous serre ; culture de tomate :

- Température de l'air.
- Humidité de l'air.
- Evapotranspiration.

### 2.3 Présentation des essais de phytostimulation

Deux essais de phytostimulation ont été réalisés selon les interactions : *Pseudomonas fluorescens* x culture de tomate et *P. fluorescens* x culture de pomme de terre. Le choix des plantes hôtes a été réalisé afin d'évaluer l'effet des souches bactériennes sur la tomate dont la partie consommable est un fruit et sur la pomme de terre dont la partie qui présente une importance économique est le tubercule qui est une tige souterraine se trouvant en contact direct avec les bactéries.

#### 2.3.1 Phytostimulation de la tomate

##### 2.3.1.1 Semence de tomate

Deux cultivars de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) : variété NEDJMA et variété AGORA ont été utilisés dans notre expérimentation. D'après les études de l'ITCMI, Parmi celles présentes dans la grande liste des variétés : NEDJMA et AGORA sont des variétés à gros fruits très sollicitées par les agriculteurs pour leur bon rendement surtout dans la zone maraîchère du littoral et pour leur résistance à différentes maladies.

Les caractéristiques agronomiques des deux variétés de tomate sont :

- Variété NEDJMA : c'est un hybride F1 à port indéterminé demi précoce, très vigoureux, la plante noue bien en hiver. Le fruit est très gros de forme globe bien coloré et très ferme avec collet légèrement vert, le poids moyen du fruit : 220 - 250 g, elle donne une production assez bonne. La variété est résistante au ; TMV : Virus de la mosaïque du tabac, Fusarium, Nématodes.
- Variété AGORA : c'est un hybride F1 précoce à port indéterminé, aéré de cycle moyen et vigoureux. Le fruit est très gros, de forme ronde à oblongue avec collet vert, le poids moyen du fruit : 200- 220 g, la production en fruits est très élevée. La variété est résistante au ; TMV Virus de la mosaïque du tabac, au Fusarium et aux Nématodes.

Ces semences certifiées, sont importées de France (Marques : PS PETOSEED pour NEDJMA et VILMORIN pour AGORA) (Appendice E). Pour le semis des variétés, 2 g de semences soit 600 graines sont utilisés, ils sont répartis sur douze plaquettes d'alvéoles en plastique.

Avant inoculation, les graines de tomate sont stérilisées. L'eau javellisée à 6° est préconisée pour une bonne désinfection des semences. Les étapes suivantes sont suivies pour assurer une bonne désinfection, chaque lot de semence est trempé successivement dans les boîtes de Pétri en verre contenant :

- Eau javellisée à 6° pendant 20 minutes.
- Eau distillée stérile 2 à 3 rinçage pendant 3 – 5 minutes chacun.

Les semences désinfectées sont recueillies délicatement et déposées dans une boîte de Pétri stérile sur du papier buvard, cette étape est répétée plusieurs fois jusqu'au séchage complet des semences. La désinfection des semences est réalisée sous hotte (GÖSSNER GS 640) stérile balayée par un flux de rayon UV.

#### 2.3.1.2 Substrat du semis

Le substrat utilisé pour le semis est un mélange de tourbe et de marc de raisin, suivant les proportions :

- Deux tiers (2/3) de terreau stérile (VAM).
- Un tiers (1/3) de marc de raisin desséché fourni par la station expérimentale de l'ITCMI Staouéli.

VAM 50 I est un terreau spécialisé pour le semis et bouturage (Hollande). Ce substrat est composé de tourbe noire, de tourbe blonde, de sable et de carbonate de calcium (Matière sèche 30%). Afin d'éviter la destruction des racines des jeunes plants ce mélange de terreau est en particulier tamisé. Des engrais organiques (18% ; NPK (7-6-6) 1 kg/m<sup>3</sup>) et chimique (NPK (14-16-18)) avec des oligoéléments (0.75 kg/m<sup>3</sup>) ont été additionnés pour une meilleure formation racinaire des plants (Appendice F).

Ce terreau est stérile à l'origine, cependant un essai préliminaire a été pratiqué pour une confirmation. Une petite quantité (10 g) de tourbe a été prélevée du sac dans des conditions aseptiques, mélangée avec de l'eau distillée stérile, la suspension obtenue a été étalée sur un milieu de culture gélosé stérile. La confirmation se base sur le développement de germes après 3 à 5 jours d'incubation. Le marc de raisin est stérilisé deux fois à l'autoclave à 120°C pendant 20 minutes avec 24 heures d'intervalle entre chaque stérilisation : il est versé dans des Erlenmeyers en verre de 5 l hermétiquement fermés. La stérilisation a été réalisée à deux reprises en raison des utilisations répétées de ce substrat.

### 2.3.1.3 Bactérisation

#### 2.3.1.3.1 Préparation de l'inoculum bactérien

L'inoculum bactérien utilisé pour la bactérisation des semences de tomate, et lors des deux rappels de bactérisation, présente une concentration de 10<sup>6</sup> cfu/ml, sa préparation débute avec celle des souches bactériennes âgées de 24 heures :

- La crème bactérienne des souches purifiées (2 à 3 boîtes de Pétri) est prélevée et mélangée avec 10 ml d'eau distillée stérile dans un tube à essai.

- Le mélange est parfaitement homogénéisé à l'aide d'un agitateur, puis réparti (environ 1 ml) sur des boîtes de Pétri et étalé avec une anse stérile sur toute la surface du milieu de culture KB.
- Après 24 heures d'incubation, la crème bactérienne formée dans chaque boîte est bien développée et assez épaisse permettant la préparation de l'inoculum bactérien.

Après l'obtention des souches de 24 heures, la préparation de l'inoculum bactérien, de chaque souche est effectuée selon les étapes suivantes :

- La préparation d'une solution bactérienne concentrée de 200 ml ; les colonies bactériennes âgées de 24 heures (de plusieurs boîtes de Pétri) sont raclées délicatement avec une anse stérile, sans enlever le milieu de culture, et mélangées avec 200 ml d'eau distillée stérile dans un flacon en verre.
- Pour obtenir la concentration bactérienne recherchée :  $10^6$  cfu/ml, des ajustements sont réalisés suivant les courbes étalons des souches bactériennes ; log (cfu/ml) en fonction de log (densité optique) [168, 154] à l'aide de mesures de densité optique avec un spectrophotomètre UV (SHIMADZU mini 1240 / UV-VIS) aux longueurs d'onde  $\lambda = 580$  nm ou 620 nm selon la courbe utilisée (Appendice G).
- Une fois la densité optique recherchée est obtenue, la solution bactérienne concentrée est diluée dans le volume d'eau distillée stérile désiré. Le mélange est correctement homogénéisé manuellement par des mouvements circulaires. La suspension obtenue représente l'inoculum bactérien à une concentration de  $10^6$  cfu/ml.

Ces opérations sont effectuées dans des conditions de parfaite asepsie.

#### 2.3.1.3.2 Inoculation des semences

La désinfection des semences est suivie par une première bactérisation. Chaque lot est trempé dans l'inoculum bactérien correspondant à une des 5 souches bactériennes pendant 20 à 30 minutes, ensuite les graines sont égouttées et entreposées sur un papier buvard dans une boîte de Pétri en verre stérile avant d'être semées. La bactérisation est réalisée sous hotte stérile.

### 2.3.1.3.3 Semis

Le semis est effectué dans des alvéoles en plastiques regroupées en plaquette de 98 alvéoles (7 x 14). Chaque plaquette renferme un traitement, ainsi douze plaquettes sont disponibles pour tous les traitements (Figure 2.1). Pour cette phase préparatoire, les traitements étudiés sont les mêmes que ceux adoptés ultérieurement pour la transplantation au niveau de la serre (cf. 2.3.1.4.1). Le dispositif expérimental est en unités expérimentales, cinq répétitions seront retenues au moment de la mesure des paramètres de croissance.

Une fois les plaquettes nettoyées et séchées les alvéoles ont été remplies à raz avec le substrat stérile (chaque alvéole peut contenir environ 15 - 20 g du substrat). Le substrat a été tassé et arrosé à la fin de ces opérations avec une eau distillée stérilisée à l'autoclave et laissé ressuyer jusqu'au moment du semis.

L'opération du semis a été réalisée à raison de 2 graines par alvéoles à l'aide d'une pince stérile à une profondeur de 4 - 5 mm. Les plaquettes semées sont placées dans la pépinière en verre à température constante de 25 °C le jour et 18 °C la nuit, pour une durée de 3 à 4 semaines. Un espacement régulier entre les plaquettes portant des traitements différents est respecté pour éviter toute contamination au moment des arrosages. Elles sont recouvertes pour un premier temps par un plastique transparent avant et ceci pour augmenter la température du substrat et activer ainsi la germination des semences.

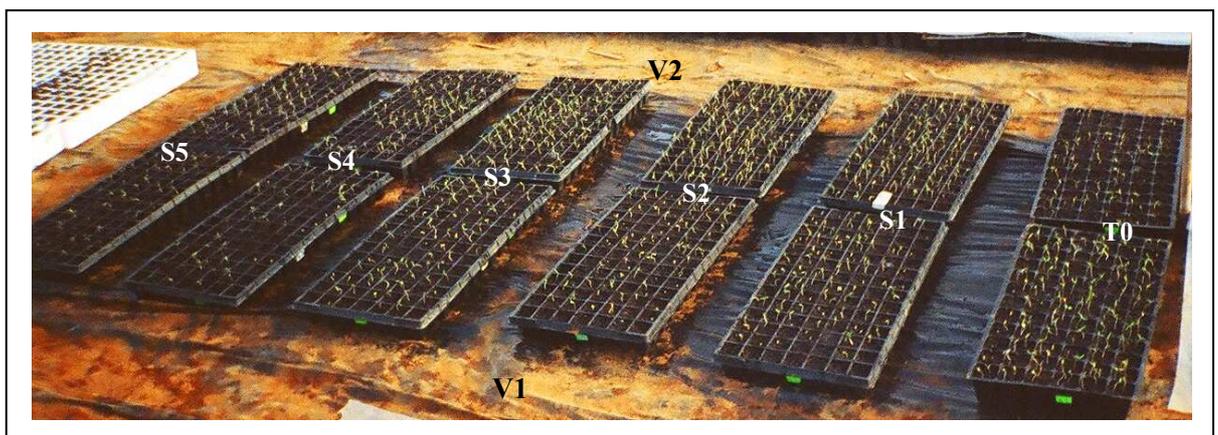


Figure 2.1 : Disposition des douze plaquettes d'alvéoles dans la pépinière

T <sub>0</sub> : Témoin	S <sub>1</sub> : CHAO	V <sub>1</sub> : variété NEDJMA
S <sub>2</sub> : C7R12	S <sub>3</sub> : P64	V <sub>2</sub> : variété AGORA
S <sub>4</sub> : S20	S <sub>5</sub> : CK4	

#### 2.3.1.3.4 Premier rappel de bactérisation des semences de tomate

Deux jours après le semis, après ressuyage complet, le premier rappel de la bactérisation a été réalisé. Pour chaque traitement nous avons versé 5 ml d'inoculum bactérien par alvéole à l'aide d'une seringue stérile. Pour le témoin, 5 ml d'eau distillée stérile sont additionnés aux semences.

#### 2.3.1.4 Transplantation des plantules de tomate dans la serre

Le suivi de l'évolution de la germination et de la levée a été entamé après 48 heures du semis à raison d'une observation quotidienne. Au niveau de la pépinière les plantules de tomate ont bénéficié ; d'une aération quotidienne, d'un triage des plants et d'un arrosage périodique avec une eau courante qui provient d'un puits de la station expérimentale.

##### 2.3.1.4.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental adopté dans cet essai est en blocs aléatoires complets (BAC) avec les deux facteurs contrôlés : (Figure 2.2)

Facteur 1 : bactérisation, composée de six niveaux ; cinq niveaux correspondent aux cinq souches de *Pseudomonas fluorescens* utilisées :

S<sub>1</sub> : CHAO.

S<sub>2</sub> : C7R12.

S<sub>3</sub> : P64.

S<sub>4</sub> : S20.

S<sub>5</sub> : CK4.

Le sixième niveau correspond au témoin, où les plants de tomate ont été conduits sans bactérisation (eau distillée): T<sub>0</sub>.

Facteur 2 : l'espèce tomate, composée de deux niveaux correspondant aux deux variétés utilisées :

V<sub>1</sub> : variété NEDJMA.

V<sub>2</sub> : variété AGORA.

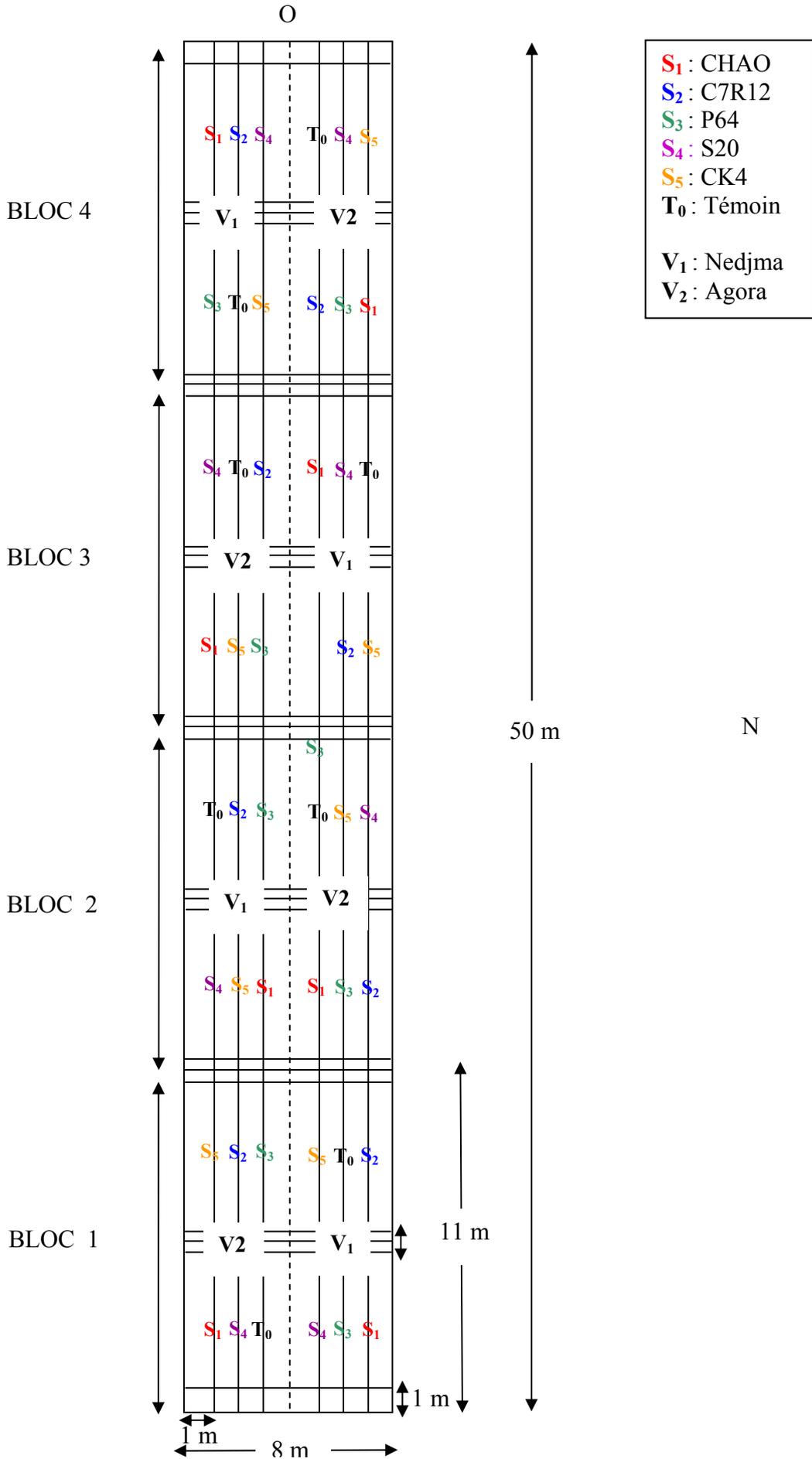


Figure 2.2 : Dispositif expérimental de la culture de Tomate sous serre en Blocs aléatoires complets (BAC)

Notre dispositif expérimental, au total, est composé de l'interaction des deux facteurs étudiés, soit douze traitements :

TémoinV1 - CHAOV1 - C7R12V1 - P64V1 - S20V1 - CK4V1.

TémoinV2 - CHAOV2 - C7R12V2 - P64V2 - S20V2 - CK4V2.

Selon le schéma du dispositif expérimental :

- Chaque ligne de plantation mesure approximativement 11m, avec des distances entre les plants de 0.40 m, le nombre de plants par ligne est d'environ 26 à 28 plants.
- Au niveau de chaque ligne deux traitements différents sont appliqués, ils sont séparés par un espacement de 1m et répartis aléatoirement. L'affectation des traitements a été effectuée par randomisation totale au niveau de chaque bloc en utilisant les tables de permutation des nombres [169].
- Chaque bloc est composé de six lignes (deux traitements par ligne) contenant les douze traitements étudiés. Chaque traitement a été répété quatre fois pour les quatre blocs.

#### 2.3.1.4.2 Plantation

La transplantation a été réalisée 40 jours après le semis, au stade 4 à 5 feuilles. Les plantules ont été retirées des alvéoles et plantées en mottes après leur démariage en sélectionnant la plante la plus vigoureuse.

Pour respecter la conception du dispositif expérimental décrit précédemment ; des pancartes de chaque traitement ont été placées au préalable aux emplacements de leur affectation. La plantation a été réalisée en utilisant des gants stériles pour chaque traitement, ceci pour éviter le contact de particules de sol entre les différents traitements (Figure 2.3). Après l'installation des plantules, les trous de plantations ont été refermés et les vannes des goutteurs sont ouvertes.

La fréquence d'irrigation (2 à 3 jours) ainsi que la durée (1 à 2 heures) dépendent de la température de l'air et de l'état des plantules. Les plants de tomate ont été arrosés jusqu'à humectation complète du sol à proximité des

plantes. Si la température et l'humidité sont élevées sous serre, les portes avant et arrière sont laissées ouvertes, des ouvertures sont également réalisées (fenêtres) tout au long de la serre pour une aération convenable.

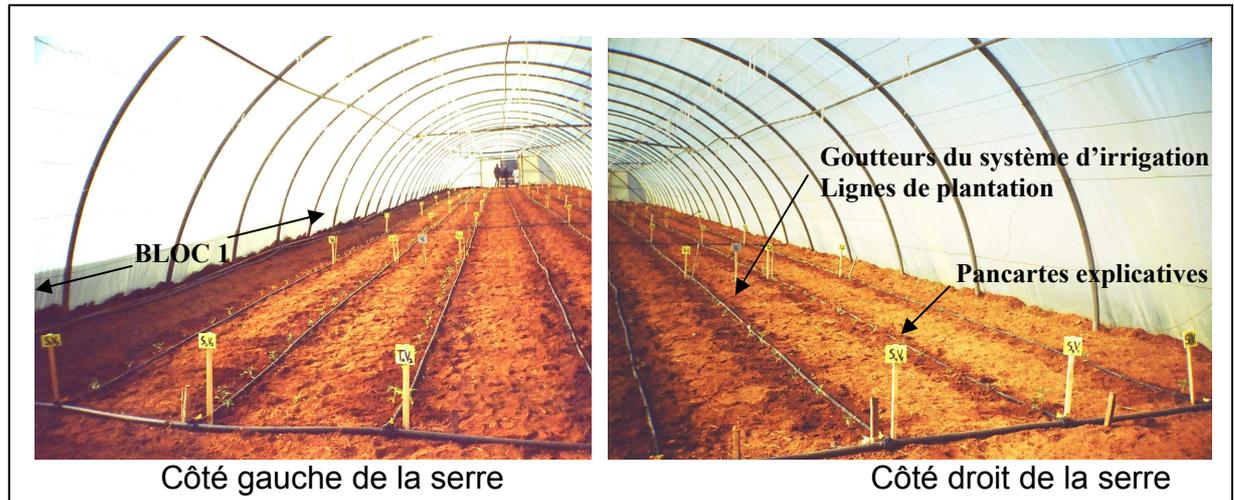


Figure 2.3 : Photo de la serre après plantation suivant le dispositif expérimental

Selon le nombre de plants par lignes qui varie de 26 à 28, au niveau de chaque bloc, le nombre de plants est de 165 à 168 soit un total de 669 plants dans la serre, dont 55 plants pour chaque traitement.

#### 2.3.1.4.3 Deuxième rappel de la bactérisation

Une semaine après la plantation, un deuxième rappel de bactérisation a été réalisé. Au niveau de la serre, chaque traitement est représenté par 110 plants pour les deux variétés, le volume d'inoculum bactérien administré pour chaque plant est de 45 ml. Pour le témoin 45 ml d'eau distillée stérile ont été apportés.

L'opération de distribution de l'inoculum a été réalisée délicatement, la terre au niveau du collet est préalablement retournée et binée, en créant un petit bassin, pour faciliter la localisation de l'inoculum bactérien dans la rhizosphère. Les plants de tomate sont arrosés quelques heures avant la bactérisation pendant 1 à 2 heures.

Après ce dernier rappel, la surveillance des plants de tomate a été réalisée quotidiennement. Le suivi de la culture selon les variables étudiés a été assuré

durant tout le cycle de la culture jusqu'à l'arrachage des plants soit une période de huit mois.

#### 2.3.1.4.4 Travaux d'entretien des plants de tomate

Les plants de tomate sous serre ont bénéficié de plusieurs travaux d'entretien, chaque 15 à 20 jours selon la rapidité du développement des plants:

- Un binage autour des plants et désherbage manuel de toute la serre surtout au voisinage des plants.
- Un ébourgeonnage : les bourgeons axillaires (à l'aisselle des feuilles) sont pincés ; la culture est conduite sur une seule tige principale.
- Un effeuillage ou un élagage est réalisé (les feuilles de la base et celles pouvant encombrer le plant) pour aérer la plante et favoriser le développement des boutons floraux et le grossissement des fruits.
- Les plants chétifs ou laissant apparaître des symptômes ont été éliminés.
- Un palissage des plantules de tomate est effectué un mois après plantation, avec une ficelle (raphia) attachées aux armatures de la serre et à la base de chaque plant. Les plants de tomate seront enroulés autour de leur tuteur au fur et à mesure de leur croissance et développement pour éviter que la tige ne se casse ou qu'elle rampe au sol.
- un étêtage ou écimage pour arrêter la croissance des plants de tomate est réalisé avant la 8<sup>ème</sup> récolte, pour favoriser la fécondation des fleurs formés et la maturation et le grossissement rapide des fruits.

Toutes les précautions sont prises pour éviter l'introduction de nouvelles maladies ou la transmission de maladies existant dans la serre à d'autres plants à savoir l'utilisation des gants stériles et la désinfection du matériel avec de l'eau javellisée.

#### 2.3.1.4.5 Traitements phytosanitaires

Initialement nous avons souhaité la conduite de cet essai sans l'application d'aucun produit chimique phytosanitaire vu leur caractère biologique. Cependant la propagation trop rapide des symptômes de plusieurs maladies cryptogamiques (Mildiou, Fusarium, Pythium) nous a obligé à traiter chimiquement. Les produits utilisés sont généralement préconisés pour la lutte préventive, ce sont des

produits de contact à faible rémanence. Les produits sont appliqués par pulvérisateur manuel directement sur les parties malades du végétal en évitant de diriger le jet vers le sol, les parois internes de la serre ont également été aspergées par le produit : (Appendice H)

- Le PROPINEBE : à raison de 100 g/serre.
- Le MANEBE : à raison de 100 g/ serre.

#### 2.3.1.5 Suivi de la culture de tomate

Pour la réalisation des opérations de suivi des plants de tomate sous serre, au niveau de chaque bloc, six plants sont choisis aléatoirement et marqués par des étiquettes numérotées de un (01) à six (06). Ainsi pour chaque traitement, ces vingt quatre (24) plants représentent un échantillon de la population concernée. Les plants sélectionnés ont été suivis tout au long du cycle de la culture de tomate.

Chaque sept à quinze jours un suivi a été réalisé sur les plants marqués, il concerne plusieurs paramètres de croissance et de développement.

##### 2.3.1.5.1 Taux de levée

Cette opération consiste à compter pendant quatre semaines le nombre de graines germées et calculer le taux de germination par rapport au nombre total des graines semées dans les alvéoles.

##### 2.3.1.5.2 Paramètres de croissance avant transplantation

Ces paramètres sont suivis après cinq semaines de la première bactérisation. Cinq plantules de tomate (répétitions) sont choisies aléatoirement sur la plaquette d'alvéoles pour chaque traitement ; les paramètres étudiés sont :

- Hauteur des plants : du collet à l'apex.
- Longueur des racines : le système racinaire est recueilli délicatement après un dépotage, le plant est incisé au niveau du collet.
- Poids frais de la partie aérienne, il est réalisé sur place immédiatement après la coupe pour éviter les pertes par transpiration.
- Poids frais du système racinaire, ce dernier est rapidement rincé avec de l'eau propre et essuyé avec du papier absorbant pour éliminer les

particules du substrat adhérent au chevelu racinaire. et pesé aussitôt après cette opération.

- Les poids secs de la partie aérienne et du système racinaire sont obtenus après passage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.

#### 2.3.1.5.3 Paramètres de croissance et développement après transplantation

Un suivi est réalisé chaque semaine dans la serre de tomate concernant plusieurs paramètres de croissance et de développement.

##### 2.3.1.5.3.1 Paramètres de croissance

Quatre semaines après la transplantation, l'état des plants plantés s'est stabilisé, les paramètres suivants sont évalués :

- Hauteur des plants du collet à l'apex.
- Nombre de feuilles par plants.
- Diamètre de la tige à un centimètre du collet.

D'autres échantillons sont prélevés à la fin de la culture après la dernière récolte de fruits ; deux à trois systèmes racinaires complets (dix racines par traitement pour toute la serre) sans leurs mottes, ils sont convenablement lavés pour éliminer le sol adhérent. La biomasse des racines de tomate est ensuite notée; le poids frais (aussitôt après la coupe) et le poids sec après séchage à l'étuve à 105°C.

##### 2.3.1.5.3.2 Paramètres de floraison

Après 65 jours de la transplantation, les paramètres suivants sont étudiés pendant plusieurs semaines :

- Nombres de bouquets floraux par plant notés à trois périodes différentes.
- Nombre de fruits noués par bouquet.
- Diamètres des fruits noués.

##### 2.3.1.5.3.3 Paramètres de production

L'entrée en production des fruits a débuté 98 jours après la transplantation. La récolte s'est échelonnée sur une période de 70 jours à raison d'une à deux

récoltes par semaine. Pour chaque récolte (douze récoltes en totalité), plusieurs paramètres ont été étudiés :

- Poids et diamètre de chaque fruit d'un plant de tomate.
- Poids des fruits par plant de tomate (production en fruits de chaque plant).
- Deux à trois fruits de chaque récolte (les quatre blocs confondus) sont choisis parmi le lot récolté (fruits murs, rouges et turgescents) de chaque traitement, ils sont utilisés pour déterminer le poids frais et sec des fruits de tomate après séchage à l'étuve à 105°C pendant 2 à 3 jours.

Des résultats moyens sont par la suite calculés pour les six répétitions des traitements au niveau de chaque bloc pour effectuer les analyses statistiques.

#### 2.3.1.5.4 Extraction et dosage des protéines totales

La concentration totale des protéines solubles présentes dans le matériel végétal est déterminée suivant la méthode ; WARBURG et CHRISTIAN (1941) [170]. Cette méthode requiert la mesure de la densité optique par spectrophotométrie à deux longueurs d'onde différentes ; 280 nm (pour les protéines) et 260 nm (pour les acides nucléiques produisant des interférences) [171].

Les étapes suivantes sont réalisées dans des conditions de froid pour éviter la dénaturation des protéines totales :

- Broyer convenablement à froid sur un lit de glace 1 g de feuilles fraîchement cueillies et très jeunes entre pilon et mortier avec une petite quantité de sable de rivière purifié et stérilisé.
- Ajouter au fur et à mesure du broyage 5 ml d'acétate d'éthyle pur.
- Le résultat du broyage est versé dans un tube spécial de centrifugeuse réfrigérée à 12000 tour/minute pendant 10 à 15 minutes à 4°C.
- La densité optique du surnageant est obtenu après lecture au spectrophotomètre UV au deux longueurs d'onde 260 et 280 nm.
- Le taux (la quantité) des protéines totales est calculé par la formule suivante :

$$P \text{ (mg/ml)} = 1,55 A_{280} - 0.76 A_{260}$$

La même méthode est utilisée pour extraire et doser les protéines totales contenues dans les jeunes feuilles et dans les fruits à maturité.

A partir des feuilles, deux dosages sont réalisés à deux stades phénologiques différents :

- Au stade 9 à 10 feuilles (50 jours après transplantation)
- Lors de la première récolte des fruits (3 mois après la transplantation).

Au niveau de chaque bloc, les plus jeunes feuilles de plusieurs plants sont prélevées, ils sont ensuite convenablement mélangés en un échantillon moyen représentatif de chaque traitement. Trois prises d'essais de 1 g sont effectuées représentant les répétitions de l'analyse

Les fruits sont choisis aléatoirement à la 6<sup>ème</sup> récolte (en période de pleine production), 34 jours après la 1<sup>ère</sup> récolte. La prise d'essai (1 g) est prélevée au niveau de la pulpe de la tomate dans la moelle du fruit (le parenchyme médullaire), elle a été répétée trois fois.

#### 2.3.1.5.5 Activité rhizosphérique

Après la dernière récolte des fruits, avant arrachage des plants (la fin du cycle de la culture), des échantillons de sol et de racines sont prélevés pour étudier plusieurs paramètres.

Pour chaque traitement, deux à trois systèmes racinaires entiers sont prélevés avec leur motte de terre (rhizosphère) aléatoirement, ces prélèvements (les quatre blocs confondus) sont ensuite mélangés en un seul échantillon représentatif. Le sol de ces prélèvements est divisé en deux lots :

- Le premier a été utilisé pour le dosage des deux éléments minéraux phosphore et potassium.
- Le deuxième lot est aussitôt conservé dans des conditions stériles au réfrigérateur à 4°C avec les racines, il a été utilisé pour la détermination de la dynamique des populations bactériennes des souches inoculées.

#### 2.3.1.5.5.1 Dosage des éléments minéraux

Le sol destiné aux analyses pédologiques a été mis à sécher à l'air libre pendant 5 à 7 jours, il est ensuite broyé à l'aide d'un mortier et tamisé à 2mm pour avoir une terre très fine, les instruments utilisés sont correctement nettoyés d'un traitement à un autre. Trois répétitions sont retenues pour chaque traitement. Ces analyses sont réalisées au laboratoire de pédologie de l'ITAF.

Les méthodes de mesure utilisées sont les suivants (Appendice I) :

- Dosage du phosphore assimilable selon la méthode OLSEN basée sur une extraction à l'aide de bicarbonate de sodium 0.5 N et une colorimétrie suite à la formation et la réduction d'un complexe de l'acide molybdique après apparition d'une coloration bleue. La densité optique des différents extraits est obtenue par lecture au spectrophotomètre UV (PHARMACIA L.K.B Novaspec II) à une longueur d'onde de 650 nm [163, 164, 165].
- Dosage du potassium assimilable par la méthode METSON, elle est basée sur une extraction par une solution d'acide chlorhydrique HCl 2N, l'extrait est ensuite dosé par spectrophotométrie de flamme ( Flame Photometer : JENWAY CLINICAL PFP7) [166, 167].

#### 2.3.1.5.5.2 Dynamique des populations bactériennes

Pour vérifier la compétence rhizosphérique et la colonisation racinaire des souches bactériennes inoculées aux plants de tomate, la détermination de la survie et la dynamique des populations des souches bactériennes introduites est nécessaire. La méthode utilisée est basée sur la suspension - dilution du sol et des échantillons de racines et sur l'inoculation de milieu de culture spécifique KB (Appendice A) avec les dilutions adéquates, cette étape est suivie par le dénombrement des colonies apparues après 24 heures d'incubation à 25°C.

Cette méthode permet de connaître la concentration finale des bactéries au niveau de la rhizosphère des cultures correspondant à chaque souche, sachant que la concentration initiale des bactéries introduites était de  $10^6$  cfu/ml.

Les échantillons du sol et des racines prélevés pour chaque souche sont de trois types :

- Le sol rhizosphérique ; 10 g du sol dans 90 ml d'eau distillée stérile : solution  $10^{-1}$ .
- Les racines ; un système racinaire entier trempé et convenablement mélangé avec 90 ml d'eau distillée stérile pour enlever toute les particules de sol adhérees aux racines; solution  $10^{-1}$ .
- Les racines récupérées après leur rinçage à l'eau distillée stérile et séchage sur papier filtre stérile.

Pour le dernier échantillon, les racines sont coupées en petites portions (2 cm) ou gardées entières, elles sont déposées délicatement sur le milieu de culture KB (dans des conditions aseptiques) à l'aide d'une pince stérile, les racines secondaires et les radicelles sont bien étalées dans la boite de pétri. Cette opération permet de mettre en évidence et visualiser directement l'adhésion des souches bactériennes sur les racines après une incubation de 24 à 48 heures.

### 2.3.2 Phytostimulation de la pomme de terre

#### 2.3.2.1 Les tubercules de pomme de terre

Les tubercules utilisés dans l'expérimentation sont d'origine locale, ils proviennent ainsi de la wilaya de Aïn Defla qui est considérée comme une région stratégique pour le développement de la culture de la pomme de terre. Ce matériel végétal (tubercules) a été certifié par les services du CNCC (centre nationale de contrôle et de certification).

##### 2.3.2.1.1 Caractéristiques de la variété

La variété utilisée dans l'essai de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) est la SPUNTA, c'est l'une des variétés les plus appréciées par les producteurs de pomme de terre pour plusieurs raisons :

- C'est une variété, demi précoce, vigoureuse, très productive qui donne un rendement assez élevé, elle est résistante à plusieurs maladies mais assez sensible au mildiou [172].

- Le tubercule allongé à peau blanche est très apprécié par les consommateurs [172].
- La SPUNTA s'adapte très bien aux conditions agro- climatiques de la région de Staouéli et surtout au sol léger de la station expérimentale, elle est habituellement très utilisée dans les essais de L'ITCMI.

Cinq quintaux de tubercules (conditionnés dans 10 sacs à 50 kg chacun) ont été nécessaires pour notre plantation, rappelons que le terrain de cette culture fait environ 3000 m<sup>2</sup>. (30 quintaux de pomme de terre par 1 hectare). Les tubercules réceptionnés sont de calibres mélangés ; petit, moyen et gros calibre. Les bourgeons sont en début de germination, ils ne sont pas très développés.

#### 2.3.2.1.2 Préparation des tubercules de pomme de terre

A la réception des tubercules, un tri préliminaire rapide est effectué pour éliminer les tubercules malades, pourris ou blessés. Les tubercules sains sont répartis dans 42 clayettes et sont ensuite désinfectés avant leur bactérisation et plantation.

La désinfection des tubercules se fait par un trempage dans une eau javellisée à 6° pendant 15 à 20 minutes suivi de deux rinçages successifs avec de l'eau. Les tubercules désinfectés sont convenablement étalés sur une surface préalablement désinfectée. Enfin un dernier rinçage avec de l'eau courante stérilisée à l'autoclave (à 120°C pendant 20 minutes) a été réalisé à l'aide d'un arrosoir.

Les tubercules désinfectés sont laissés à sécher à l'air libre dans un grand abri pendant deux jours. Après leur séchage complet, ils sont triés une deuxième fois (Figure 2.4)

Les tubercules de pomme de terre triées, désinfectées et séchées sont remis dans les clayettes nettoyée et déposés en chambre de prégermination à température constante de 15°C en obscurité totale. Les 42 clayettes sont déposées les unes sur les autres et sont couvertes par des films plastiques pour augmenter la température et l'hygrométrie à proximité des tubercules et accélérer le processus de prégermination des bourgeons.



Figure 2.4 : Tubercules désinfectés avant leur prégermination

La prégermination a pour but de placer très tôt les tubercules dans des conditions de température et d'hygrométrie favorables au développement des germes, afin de raccourcir le délai entre plantation et levée. Elle vise à obtenir des germes trapus, colorés et de longueur homogène [156].

Selon les pratiques adoptées par les techniciens de l'ITCMI et du Centre de développement de la pomme de terre du Canada, il apparaît que la prégermination accélère la tubérisation, le grossissement et la maturation des tubercules, elle permet également d'augmenter le nombre de tiges par plant et par voie de conséquence le nombre de tubercules.

#### 2.3.2.2 Bactérisation

L'inoculation bactérienne a été effectuée par pelliculage en mélangeant l'inoculum bactérien des cinq souches séparément (l'eau distillée stérile pour le témoin) avec un substrat constitué de tourbe stérile. La tourbe utilisée est de type KLASMANN (Appendice J).

Les substrats KLASMANN TS3 70I (France) sont utilisés pour la production de jeunes plants maraîchers en alvéoles et de plantules ornementales en godets et pots. C'est un substrat à base de tourbe de sphaigne, moyennement décomposée, il est très riche en matière organique (90 % en masse de produit

sec), les engrais additionnés sont ; NF U 42-100 NPK 14-16-18 en kg/m<sup>2</sup> et des engrais enrobés. La matière sèche est de 30 % en masse de produit brut.

L'inoculum bactérien a été préparé suivant les mêmes étapes de la méthode adoptée lors du premier essai de la culture de tomate (cf. 2.3.1.3.1). La concentration bactérienne initiale est de 10<sup>6</sup> CFU/ml pour chaque souche bactérienne.

La quantité totale de tourbe utilisée est divisée en douze lots de 5 kg, chaque lot étant réservé pour un traitement. Les volumes de l'inoculum bactérien sont additionnés aux lots de tourbe dans un grand sac en plastique. Pour répartir correctement l'inoculum bactérien sur les particules de la tourbe, ces deux ingrédients sont soigneusement mélangés en retournant, massant fortement le sac contenant la tourbe dans tous les sens. Cette mixture convenablement mélangée forme ainsi un substrat bactérisé qui est incorporé avec les tubercules au moment de leur plantation.

Au voisinage de chaque tubercule planté 15 g de tourbe traitée ont été incorporés, en enveloppant totalement le tubercule, cette répartition est réalisée à l'aide de gobelets stériles à capacité maximale de 15 g.

### 2.3.2.3 Plantation des tubercules de pomme de terre

#### 2.3.2.3.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental de la culture de pomme de terre a été réalisé en blocs aléatoires complets. Ce dispositif expérimental est divisé en deux parties, la première est réservée à l'essai avec fertilisation minérale (Essai 1) et la deuxième à l'essai sans fertilisation minérale (Essai 2). Quatre répétitions (blocs) sont retenues pour chaque essai (Figure 2.5).

La fertilisation utilisée pour le premier essai consiste en une fumure de fond NPK et une fertilisation d'entretien ; Potasse et Urée.

Le facteur de la bactérisation est constitué de 6 niveaux pour chacun des deux essais :

- S<sub>1</sub> : souche CHAO.
- S<sub>2</sub> : souche C7R12.
- S<sub>3</sub> : souche P64.
- S<sub>4</sub> : souche S20.
- T<sub>5</sub> : souche CK4.
- T<sub>0</sub> : témoin ; eau distillée.

L'expérimentation sur la culture de pomme de terre contient ainsi six traitements pour chaque essai :

Essai 1 : Témoin 1- CHAO 1 - C7R12 1 - P64 1 - S20 1 - CK4 1.

Essai 2 : Témoin 2 - CHAO 2 - C7R12 2 - P64 2 - S20 2 - CK4 2.

La surface totale de chaque essai est divisée en quatre parcelles (blocs) de dimension égale à 280 m<sup>2</sup> (20 x 14 m) :

- Le bloc contient 6 lignes de plantation dont chacune représente un traitement. L'affectation des traitements au niveau des blocs est en randomisation totale en utilisant les tables des permutations des nombres de 1 à 10 [169].
- Une distance maximale de 2 m a été laissée entre les lignes de plantation.
- Des bordures de largeur supérieure à 2 m entourent chacun de ces blocs.

Avec une distance de 0.35 m entre les plants, chaque ligne de plantation (20 m) porte 57 plants. Chaque essai porte 1368 plants dont 228 plants pour chacun des six traitements.

#### 2.3.2.3.2 Plantation

La veille de la plantation des tubercules, la parcelle est irriguée pour ameublir le sol et humecté le lit de semence. Après la plantation et la bactérisation les parcelles sont privées d'eau pendant 2 à 3 jours pour éviter le lessivage des suspensions bactériennes.

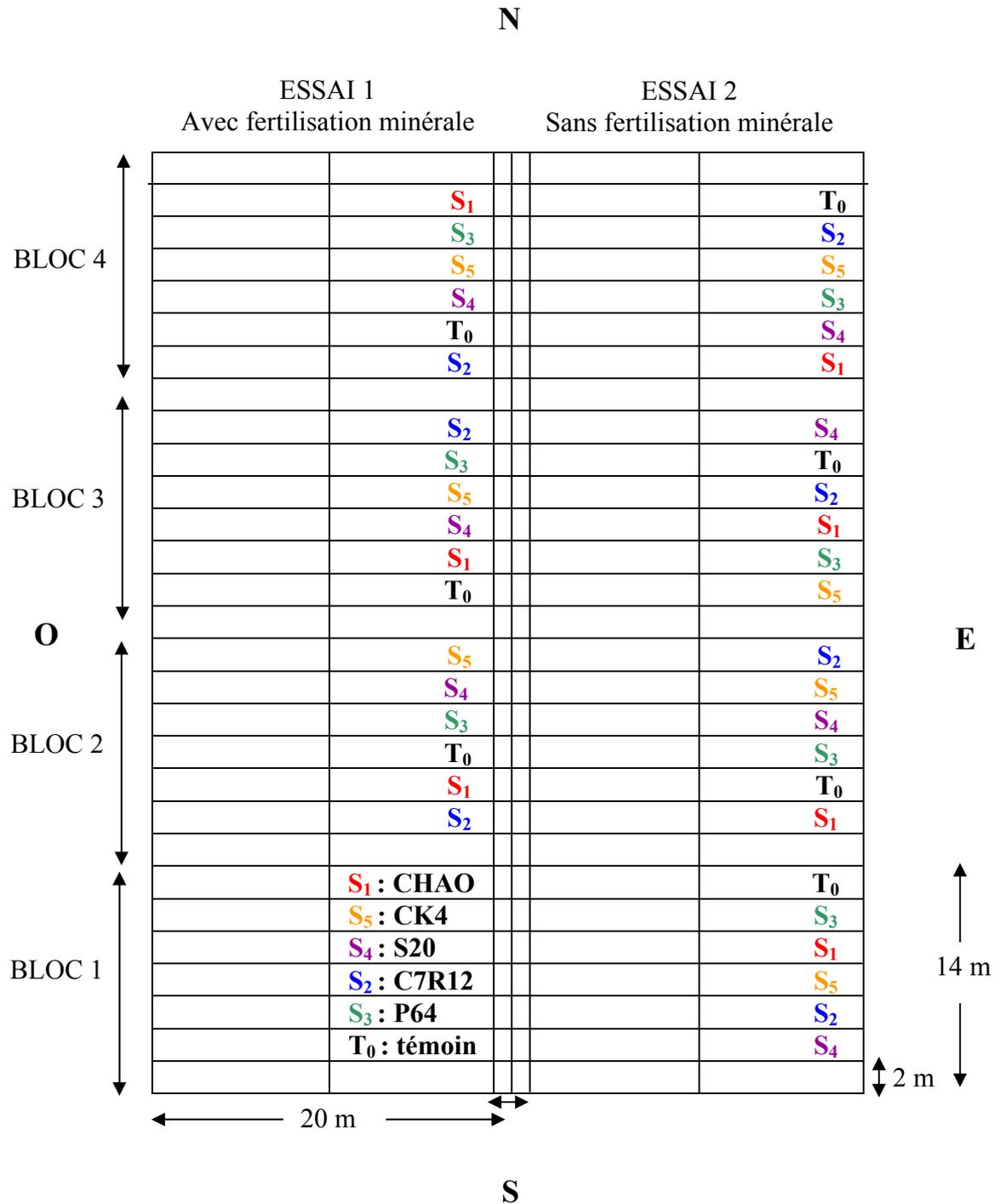


Figure 2.5 : Dispositif expérimental de la culture de Pomme de terre en plein champ (variété SPUNTA) en blocs aléatoires complets (BAC)

Suivant le dispositif expérimental précisé plus loin, la culture de pomme de terre renferme deux essais, des affiches explicatives sont préalablement placées indiquant l'emplacement de chaque traitement au niveau des lignes de plantation

facilitant ainsi le déroulement des opérations de plantation et évitant les risques d'erreur et de confusion entre les traitements (Figure 2.6).

Le rayonnage (ouverture des sillons de plantation) a été réalisé manuellement à l'aide d'une binette le jour de la plantation, les tubercules sont mis en place à une distance de 0,35 m et une profondeur de quelques centimètres (3-5 cm du niveau du sol). Le germe (bourgeon germé) s'est bien développé, il est trapu d'environ 1 à 2 cm verdâtre et un peu violacé.



Figure 2.6 : Plantation des tubercules de pomme de terre, suivie de leur bactérisation selon le dispositif expérimental

Une fois la mise en place des tubercules au fond des sillons terminée, l'incorporation de la tourbe inoculée est aussitôt réalisée en entourant complètement le tubercule planté. Des précautions sont prises en compte pour éviter tout risque de contamination ou de confusion entre les traitements.

Pour l'essai avec fertilisation minérale, une quantité d'environ 50 g de fumure de fond N P K (15, 15,15) est versée sur les tubercules inoculés. La quantité totale de fumure minérale utilisée pour cet essai est de 50 kg.

Les opérations de plantation, d'inoculation et de fertilisation réalisées, les sillons de plantation sont refermés avec des râteliers plats et les tubercules traités

sont parfaitement recouverts (Figure 2.7). Deux jours après la plantation des tubercules, toutes les vannes des goutteurs du système d'irrigation sont ouvertes pendant 1 à 2 heures pour humecter le lit de semence et favoriser la germination et la levée des plantules de pomme de terre. L'irrigation (en absence de pluie) est réalisée à raison de 2 à 3 fois par semaines pendant 1 à 2 heures par jour.

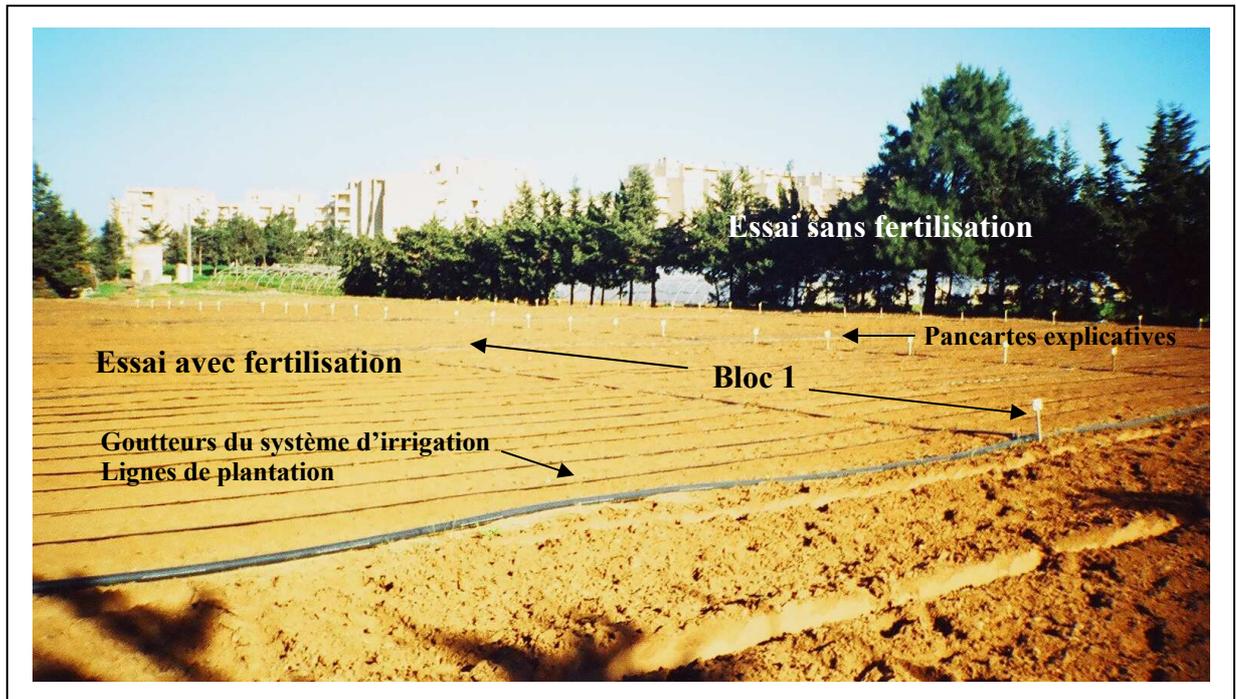


Figure 2.7 : Présentation du dispositif expérimental avec les pancartes explicatives

#### 2.3.2.3.3 Travaux d'entretien des plants

Trois mois après la plantation et la levée complète de tous les tubercules, des travaux d'entretien sont réalisés :

- Désherbage manuel ; élimination des mauvaises herbes, cette opération est réalisée plusieurs fois à cause d'une multiplication rapide des mauvaises herbes sur ce terrain.
- Des opérations de binage et buttage des plants de pomme de terre, ils sont effectués manuellement.
- Des opérations d'épuration qui consistent à extirper de la culture et détruire hors du champ les plantes malades et douteuses.

- Apport d'éléments minéraux en fertilisation d'entretien par ferti-irrigation en incorporant une pompe aspirante des éléments minéraux au niveau de la station de tête du système d'irrigation de goutte à goutte uniquement pour l'essai 1 :

L'urée (1q/ha) à raison de 11 kg et 200 g

La potasse (2qx/ha) à raison de 22 kg et 400 g

#### 2.3.2.3.4 Traitements phytosanitaires

A titre préventif et parfois après apparition de quelques symptômes annonciateurs de maladies cryptogamiques telles que le mildiou, l'alternariose, le verticilliose des traitements phytosanitaires ont été envisagés. Deux traitements avec des produits différents sont réalisés. La période de rémanence est respectée entre les deux dates d'application (Appendice H):

- Le PROPINEBE à raison de 750 g.
- Le MANEBE à raison de 700 g.

#### 2.3.2.4 Paramètres étudiés

##### 2.3.2.4.1 Taux de levée

Le suivi de la levée des plants de pomme de terre a été réalisé chaque semaine après leur plantation pendant une durée d'un mois. Le comptage des germes apparus au dessus du niveau du sol a commencé à partir du 21<sup>ème</sup> jour après la plantation jusqu'à leur complète apparition 38 jours après l'initiation de la levée. Le nombre des tubercules germés par rapport au nombre total des tubercules initialement mis en terre est ainsi calculé, c'est le taux ou pourcentage de levée.

##### 2.3.2.4.2 Paramètres de croissance et de production

Les mesures des paramètres de croissance et de production ont été effectuées à la fin du cycle de la culture au moment de la récolte des tubercules soit quatre mois après plantation.

Huit (08) plants entiers (partie aérienne, partie souterraine : racine + stolon + tubercules) sont prélevés aléatoirement dans chaque bloc, une moyenne de 32

plants pour chaque traitement a été retenue comme un échantillon représentatif de la population. A partir de ces échantillons, plusieurs paramètres ont été évalués :

- Hauteur des plants du collet à l'apex.
- Longueur du système racinaire ce dernier est obtenu après sa séparation de sa motte de sol et des tubercules.
- Nombre de tiges par plant.
- Diamètre de toutes les tiges du plant de pomme de terre.
- Nombre des feuilles du plant.
- Nombre des tubercules par plant.
- Biomasse (poids frais et sec) de la partie aérienne.
- Biomasse de la partie racinaire, les racines sont énergiquement secouées pour éliminer la terre pouvant coller au végétal et augmenter le poids de cette partie du végétal.
- Une dizaine de tubercules de chaque traitement sont utilisés pour la détermination de la biomasse.

Après la coupe, les différentes parties du végétal (partie aérienne, partie souterraine, tubercule) sont pesées directement sur place au laboratoire pour enregistrer le poids frais. Ces échantillons sont ensuite placés en étuve à 105°C pendant 24 heures (ou plus) pour l'obtention du poids sec.

#### 2.3.2.4.3 Extraction et dosage des protéines totales

Le dosage des protéines totales est réalisé à deux niveaux ; les feuilles et les tubercules, il est effectué suivant la même méthode utilisée pour la culture de tomate ; Méthode WARBURG et CHRISTIAN (1941) (cf. 2.3.1.5.4).

#### Dosage des protéines totales à partir des feuilles

Ce dosage est réalisé à partir d'échantillons de plants âgés de trois mois (après la plantation) au stade de la tubérisation quand le métabolisme végétal est intense. Les feuilles les plus jeunes sont prélevées de manière aléatoire, pour chaque traitement, et mélangés pour obtenir un seul et unique échantillon représentatif. De cet échantillon trois répétitions sont réalisées.

### Dosage des protéines totales à partir des tubercules

Au moment de la récolte, pour chaque traitement trois tubercules sont choisis au hasard (du lot des tubercules récoltés) dont chacun représente la répétition de cette analyse. Ces tubercules sont conservés au réfrigérateur à 4°C jusqu'au moment du dosage des protéines. La prise d'essai du matériel végétal (1 g) est prélevée au niveau de la moelle des tubercules car d'après ROUSSELLE [156], c'est dans cette région que les protéines contenues dans les tubercules sont en plus grande quantité, elle augmente progressivement vers la moelle.

#### 2.3.2.4.4 Activité rhizosphérique

Les plants de pomme de terre ont été prélevés avec leur motte, cette dernière est mélangée avec les autres échantillons (des autres blocs), pour former un seul échantillon représentatif de chaque traitement. Ce dernier est divisé en deux lots dont un est utilisé pour le dosage du phosphore et du potassium et l'autre pour la détermination de la dynamique des populations des 5 souches bactériennes.

Le dosage du Phosphore et du Potassium pour la culture de pomme de terre concerne uniquement l'essai 2 sans fertilisation minérale. L'essai (1) a été enrichi en engrais minéraux phosphatés et potassiques de ce fait le sol (la rhizosphère) contient un taux relativement élevé en ces éléments (P, K), ce qui rend très difficile la distinction de la différence entre les traitements.

Les méthodes utilisées pour le dosage du phosphore et du potassium (Appendice I) et pour la détermination de la dynamique des populations sont les mêmes employées pour la culture de tomate (cf. 2.3.1.5.5).

### 2.4 Analyse statistique

Les paramètres de croissance, de développement sont enregistrés tout au long des cycles de :

- La culture de tomate, du semis (28.11.05) à la dernière récolte de tomate (27.07.06), qui a duré huit mois.
- La culture de pomme de terre, de la plantation (21.12.05) jusqu'à la récolte (22.04.06), qui a duré quatre mois.

Ces paramètres permettent de nous renseigner sur l'effet des différentes souches de *Pseudomonas fluorescens* inoculées, sur la biostimulation de la croissance et du développement des plantes, sur la précocité (vitesse à laquelle ils passent d'un stade phénologique à un autre), par une augmentation du métabolisme des plantes et une amélioration de leur physiologie à différentes périodes importantes de leur cycle. Enfin le rendement de la culture est également étudié par l'enregistrement des paramètres se rapportant à la production de fruits et de tubercules, car ces essais sont réalisés dans les conditions de production habituellement réunies dans les domaines de cultures maraîchères.

Les observations représentant les différentes mesures des paramètres de croissance, de développement et du rendement (le poids, la longueur, le diamètre, le nombre, etc.) obtenues suivant les dispositifs expérimentaux des deux cultures, sont regroupées dans des tableaux de données, les moyennes des répétitions de chaque observation sont calculées et notées.

Un traitement statistique des données est réalisée par le logiciel STAT - ITCF (version 4, 1987-1988), afin de montrer si les traitements appliqués sur les deux cultures présentent des différences significatives. L'analyse de la variance a été réalisée au premier risque d'erreur  $\alpha$  5%, dans le cas d'une différence significative entre les traitements étudiés et le témoin le teste Newman-Keuls classe les moyennes des observations en groupes homogènes selon la plus petite amplitude significative PPAS entre ces moyennes. Les gains (en pourcent %) produits par la bactérisation sont calculés par rapport au témoin suivant la formule:

$$[(\text{Valeurs des plants bactérisés} - \text{valeurs du témoin}) / \text{valeurs du témoin}] \times 100$$

## **CHAPITRE 3 RESULTATS DE LA CULTURE DE TOMATE**

### 3.1 Phytostimulation de la tomate

#### 3.1.1 Taux de levée

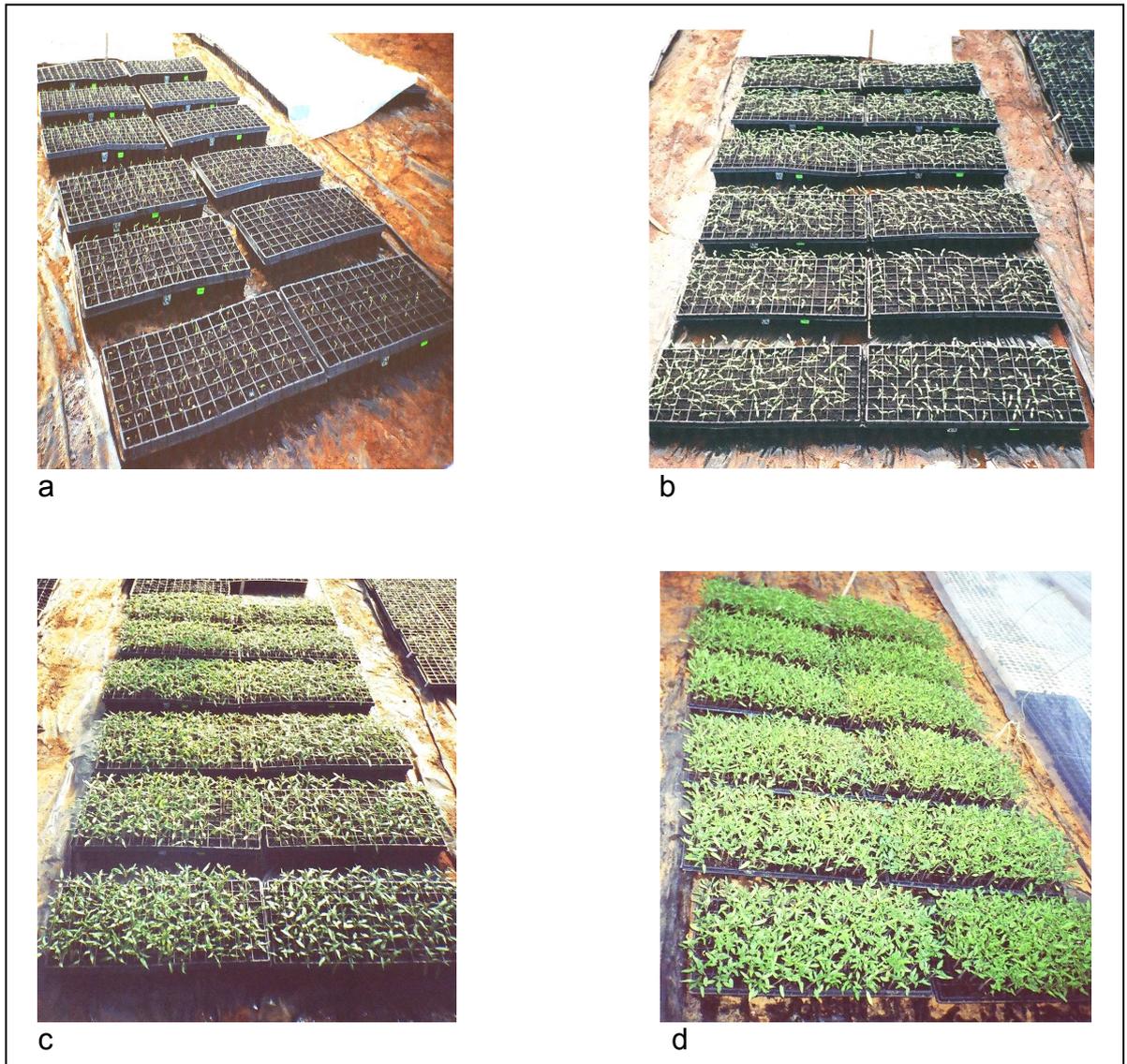
Pour l'ensemble des traitements étudiés, la levée a commencé après sept jours du semis. L'évolution de la levée des graines semées a suivi une cinétique qui apparaît en trois phases : (Figures 3.1 et 3.2)

– Les différences entre les traitements les plus marquées ont été constatées surtout durant la première phase ; 6 jours après l'initiation de la levée soit 12 jours après le semis. Pour la variété Nedjma ( $V_1$ ), l'évolution de la levée était dans sa globalité inférieure ou égale aux performances du témoin non bactérisé. Pour la variété Agora ( $V_2$ ) les plants bactérisés avec les souches CHAO, C7R12 et P64 ont montré une nette supériorité par rapport au témoin avec un maximum de 89.28% enregistré chez les plants traités avec la souche P64.

– A partir du 12<sup>ème</sup> jour la cinétique d'évolution du taux de levée a commencé à devenir constante pour s'uniformiser à la fin des notations c'est-à-dire au bout de 30 jours après le début de la levée.

– La dernière période s'étalant entre le 26<sup>ème</sup> jour et le 36<sup>ème</sup> jour est caractérisée par un rapprochement très visible des valeurs pour les deux variétés

Les résultats enregistrés chez la première variété (Nedjma) ont montré que finalement il n'y a pas d'effet apparent des bactéries sur l'accélération du taux de levée. Pour la deuxième variété (Agora) quant à elle, la supériorité des plants traités avec les trois souches P64, CHAO et C7R12 notée durant les premières dates est restée constante avec des valeurs respectivement de 94.38%, 92.84% et de 88.77%, plus élevées que celles notées chez le témoin avec 85.41%. Précisons que les plants bactérisés avec la souche P64 ont montré leur supériorité par rapport au témoin durant toute la période du suivi. De ce fait la cinétique de la levée est plus stimulée chez la variété Agora que Nedjma (Figure 3.2), (Appendice K).



Echelle  
10 cm

Figure 3.1 : Evolution de la levée des plantules de tomate  
 a. Une semaine du semis après les deux premières bactérisations  
 b. Quinze jours après semis  
 c. Vingt jours après le semis  
 d. Une semaine avant la transplantation

Notons aussi que dans l'ensemble, la levée de la variété Nedjma était meilleure que celle de la variété Agora. Ainsi à l'initiation de la levée la plus haute valeur enregistrée chez V1 était de l'ordre de 68.05% alors que celle de V2 était de 38.77%. Ce même constat est valable pour les maxima de levée (80%) qui ont été atteints plus rapidement pour V1 (8 jours après le semis) que V2 (12 jours après le semis) (Figure3.2), (Appendice K).

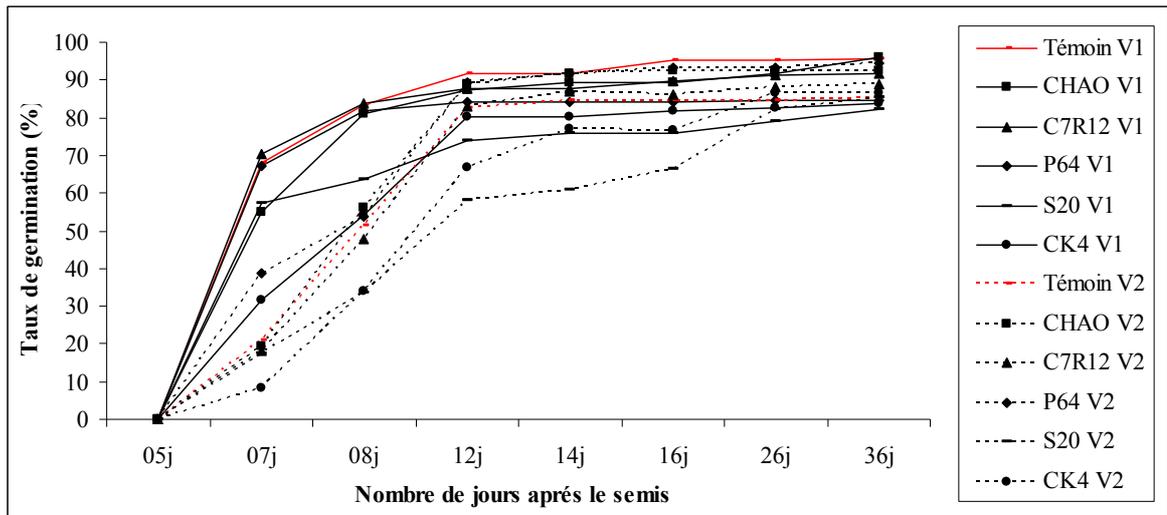


Figure 3.2 : Taux de germination des deux variétés de tomate, Nedjma (V1) et Agora (V2)

### 3.1.2 Paramètres de croissance

#### 3.1.2.1 Hauteur des plantes

Les mesures de la hauteur des plants ont été réalisées selon plusieurs périodes du cycle de la plante.

##### 3.1.2.1.1 Période avant transplantation

Durant la période avant transplantation, correspondant à 40 jours après le semis, nous avons noté une différence hautement significative entre les traitements ( $P = 0.00$ ) pour l'effet simple de la bactérisation. L'interaction des deux facteurs étudiés (souches bactériennes x variétés de tomate) ne montre pas cependant de différence significative entre les traitements bactérisés et le témoin ( $P = 0.1765$ ).

Selon le test Newman-Keuls, les hauteurs moyennes des plants sont classées en quatre groupes homogènes : A, B, BC et C. La bactérisation avec les souches CHAO et C7R12 semble ainsi donner les meilleures mesures en hauteur avec des valeurs respectivement de 18.75 cm et de 17.55 cm comparées à celles du témoin non bactérisés (17.05 cm). Les moyennes des plants traités avec ces souches appartiennent à deux groupes distincts (A et B) différents de celui du témoin (BC) (Figure 3.3).

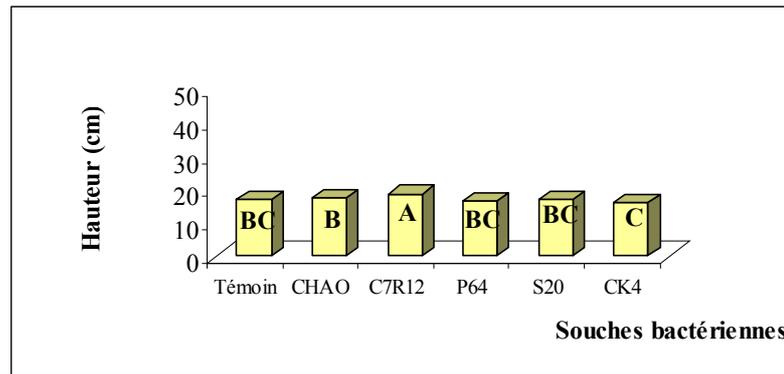


Figure 3.3 : Effet de la bactérisation sur la hauteur des plants (avant transplantation).

### 3.1.2.1.2 Période après transplantation

Le suivi de la hauteur des plants a été réalisé en quatre différentes périodes (Figure 3.4). L'analyse de la variance effectuée sur les moyennes de la hauteur des plants n'a montré une différence significative ( $P = 0.0099$ ) que lors de la première période c'est-à-dire après 30 jours de la transplantation. Ces résultats significatifs ne concernaient que l'interaction des souches bactériennes avec les deux variétés ( $P = 0.4512$ ). Les moyennes des douze traitements étaient classées selon le test Newman-Keuls en deux groupes homogènes A et B.

Pour la variété Nedjma les plus hautes moyennes (18.85 à 20.48 cm) ont été notées chez les plants traités avec les souches CK4, P64, C7R12 et S20, elles sont supérieures à celle du témoin (18.28 cm) et appartiennent au premier groupe (A) différent de celui du témoin (B) (Tableau 3.1).

Pour les trois dernières périodes (37 jours, 44 jours et 138 jours après la transplantation), l'analyse de la variance n'a pas décelé une différence significative entre les traitements étudiés. Les probabilités obtenues étaient largement supérieures à 0.05 aussi bien pour l'effet interactif des deux facteurs étudiés ( $P = 0.0649$  à  $0.3135$ ) que pour l'effet simple de la bactérisation ( $P = 0.4654$  à  $0.5675$ ) (Tableau 3.1).

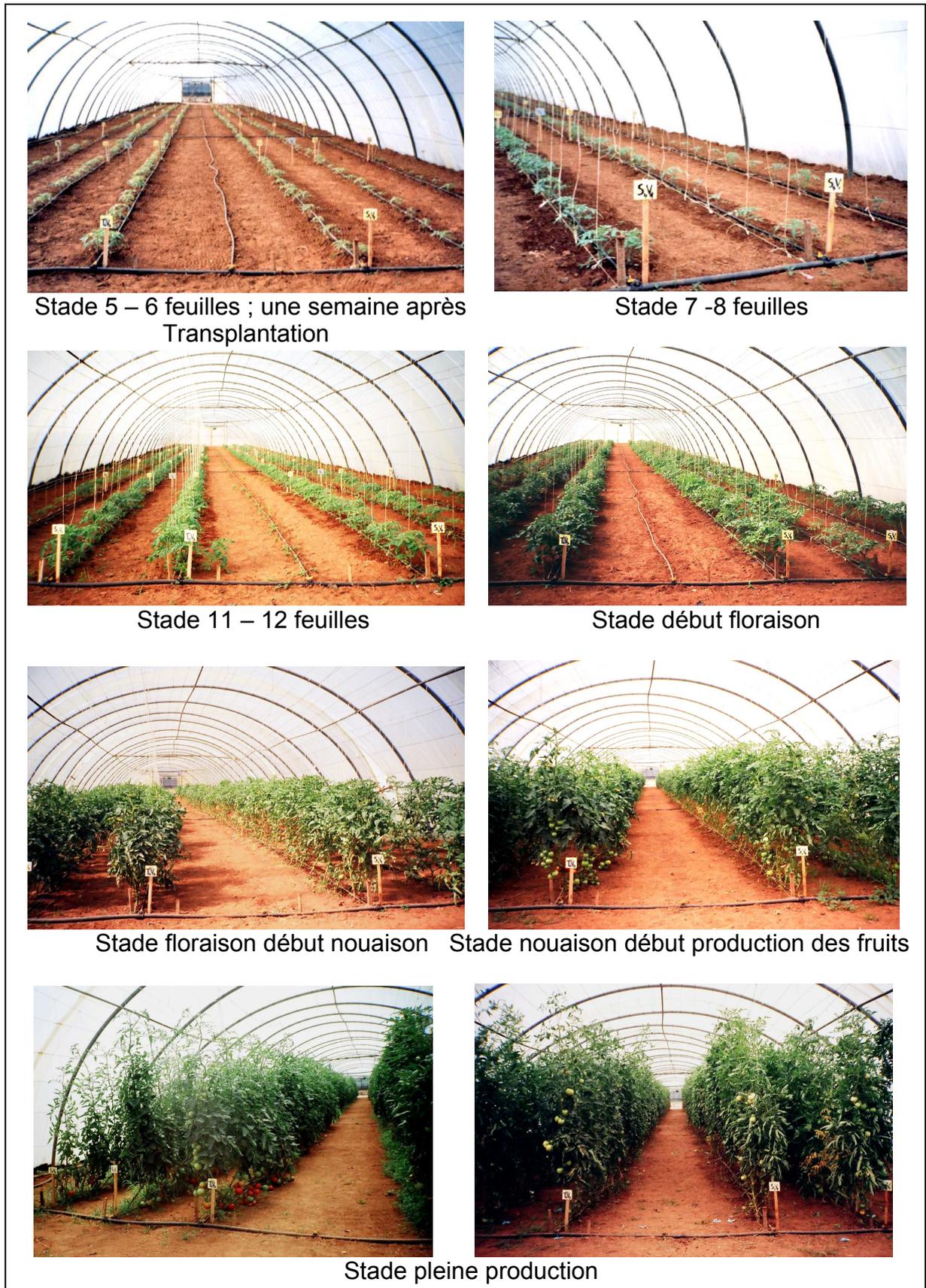


Figure 3.4 : Evolution de la culture de tomate selon les stades phénologiques : production de feuilles, floraison, nouaison, maturation des fruits.

### 3.1.2.2 Longueur des racines

L'analyse de la variance relative à la longueur des racines a montré des différences significatives pour l'interaction de la bactérisation avec les deux variétés ( $P = 0.0018$ ), ainsi que des différences hautement significatives ( $P = 0.00$ ) pour l'effet simple des souches bactériennes. Les douze moyennes obtenues de l'interaction des deux facteurs étudiés sont classées par le test Newman-Keuls en quatre groupes homogènes (Tableau 3.2). L'effet le plus marqué a été noté chez les souches CK4 (18.60 cm), CHAO (17.60 cm) pour la première variété et S20 (18.60 cm) pour la deuxième variété.

Pour l'effet simple de la bactérisation, le test Newman-Keuls a également classé les différentes moyennes en deux groupes homogènes distincts A et B. Le même constat est tenu quant à ce facteur car avec des valeurs variant entre 17.15 cm et 15.48 cm, les plants bactérisés (A) ont montré une nette supériorité par rapport au témoin (B) avec une valeur de 11.60 cm (Figure 3.5).

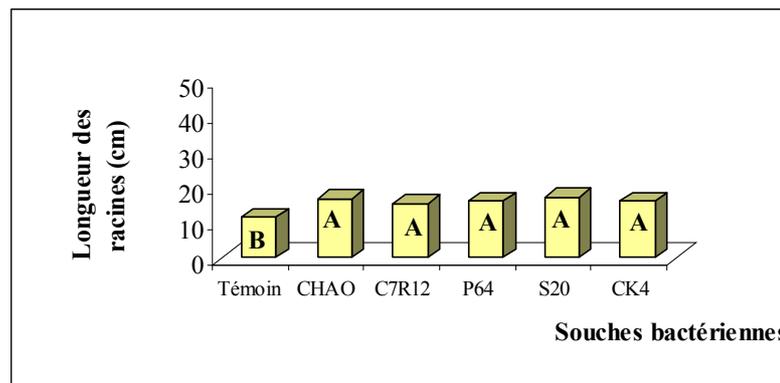


Figure 3.5 : Effet de la bactérisation sur la longueur des racines

### 3.1.2.3 Nombre de feuilles

Le suivi du nombre des feuilles des plants de tomate a été réalisé en trois différentes dates. Pour la première période, 30 jours après transplantation, avec une probabilité de 0.0226, les différences induites par l'interaction des souches bactériennes avec les deux variétés étaient significatives, c'est également le cas pour l'effet simple des bactéries ( $P = 0.0046$ ), (Figure 3.4).

Tableau 3.1 : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur la hauteur des plants de tomate (cm)

Traitements	Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
<b>Période 1</b> <b>30 jours**</b> <b>(cm)</b>	18,28 ± 1,66 <b>B*</b>	18,00 ± 1,66 <b>B</b>	18,92 ± 0,69 <b>A</b>	19,15 ± 1,80 <b>A</b>	18,85 ± 1,77 <b>A</b>	20,48 ± 0,69 <b>A</b>	20,24 ± 0,35 <b>A</b>	19,34 ± 1,50 <b>A</b>	19,92 ± 0,88 <b>A</b>	19,47 ± 1,45 <b>A</b>	17,50 ± 1,24 <b>B</b>	17,58 ± 0,94 <b>B</b>
<b>Période 2</b> <b>37 jours</b> <b>(cm)</b>	22,56 ± 2,73	23,15 ± 2,49	23,67 ± 0,71	23,93 ± 2,07	23,08 ± 1,55	25,60 ± 0,13	24,82 ± 1,13	22,30 ± 1,69	23,10 ± 3,20	24,17 ± 1,12	21,33 ± 1,96	21,48 ± 1,48
<b>Périodes 3</b> <b>44 jours</b> <b>(cm)</b>	29,60 ± 5,18	30,98 ± 4,25	31,83 ± 1,95	32,65 ± 3,27	32,21 ± 3,44	31,70 ± 4,53	33,21 ± 1,77	30,61 ± 1,04	32,21 ± 0,91	32,66 ± 1,51	30,51 ± 1,12	28,08 ± 1,44
<b>Périodes 4</b> <b>138 jours</b> <b>(cm)</b>	261,64 ± 9,42	262,92 ± 16,02	254,14 ± 12,59	265,64 ± 16,59	266,92 ± 18,96	270,85 ± 10,46	249,63 ± 3,09	255,92 ± 9,16	259,97 ± 7,43	266,41 ± 7,10	248,98 ± 5,19	256,09 ± 7,07

\* les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au risque d'erreur  $\alpha$  5% selon le test Newman-Keuls

\*\* Nombre de jours après la transplantation des plantules au niveau de la serre

Tableau 3.2 : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur la longueur des racines (cm)

Traitements	Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
<b>longueur des racines (cm)</b>	11,60 ± 1,82 <b>C *</b>	17,60 ± 2,07 <b>A</b>	17,25 ± 1,95 <b>AB</b>	17,20 ± 2,25 <b>AB</b>	16,00 ± 2,00 <b>AB</b>	18,60 ± 1,71 <b>A</b>	11,60 ± 1,14 <b>C</b>	16,10 ± 1,47 <b>AB</b>	13,70 ± 0,97 <b>BC</b>	15,10 ± 2,46 <b>AB</b>	18,30 ± 2,75 <b>A</b>	13,60 ± 1,56 <b>BC</b>

\* les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au risque d'erreur  $\alpha$  5% selon le test Newman-Keuls

Les douze moyennes obtenues, selon l'interaction des deux facteurs (bactérisation x variété de tomate), ont été classées par le test Newman-Keuls en cinq groupes homogènes A, AB, ABC, BC et C (Tableau 3.3). L'étude de ce classement a montré une différence entre les résultats obtenus avec les deux variétés de tomate.

Pour la variété Nedjma les moyennes des plants bactérisés avec CK4 (9.66), P64 (9.33), C7R12 (9.18) et S20 (9.11) appartiennent aux deux premiers groupes A et AB, alors que le témoin (8.02) se présente dans le quatrième groupe BC. Ceci montre clairement que la bactérisation avec ces souches a eu un effet sur le nombre de feuilles, contrairement à la variété Agora où les souches bactériennes ne semblent montrer aucun effet notable (Tableau 3.3).

Toujours, selon le test Newman-Keuls les différentes moyennes issues de la bactérisation sont classées en trois groupes homogènes A, AB et B. Les souches P64 (9.14) et CK4 (8.78) semblent induire les meilleurs résultats en nombre de feuilles (Figure 3.6).

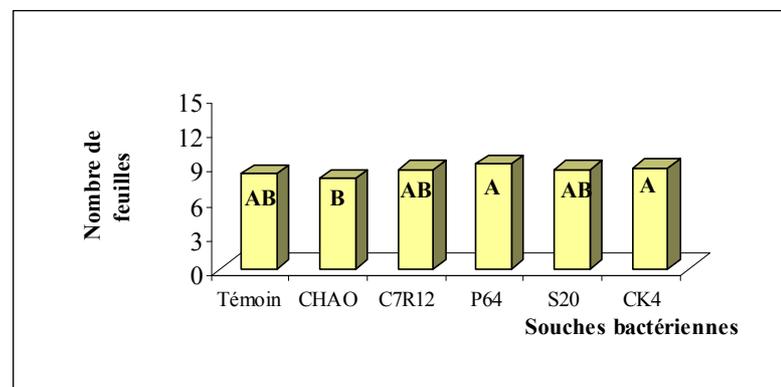


Figure 3.6 : Effet de la bactérisation sur le nombre de feuilles

L'effet significatif a été enregistré à la période du stade le plus jeune, puisque l'analyse de la variance effectuée sur les données des deux dernières périodes de suivi, c'est-à-dire à 37 et à 44 jours après la transplantation, a montré des différences non significatives pour l'effet de la bactérisation ( $P = 0.1907$  et  $0.5314$ ) ainsi que pour l'interaction des deux facteurs ( $P = 0.2926$  et  $0.6702$ ), (Tableau 3.3).

#### 3.1.2.4 Diamètre des tiges

L'analyse de la variance n'a pas décelé une différence significative entre le diamètre des tiges des différents traitements, enregistrés lors des deux périodes du suivi (44 jours et 138 jours après la transplantation) (Figure 3.4), aussi bien pour l'effet simple de la bactérisation ( $P = 0.0533, 0.5152$ ) que pour l'interaction des deux facteurs étudiés ( $P = 0.4512, 0.7571$ ), (Tableau 3.4).

#### 3.1.2.5 Poids frais et sec de la partie aérienne

##### 3.1.2.5.1 Poids frais

L'analyse de la variance des poids frais moyens obtenues avec les différents traitements a révélé une différence significative pour l'interaction des deux facteurs étudiés ( $P = 0.0002$ ) et pour l'effet simple de la bactérisation ( $P = 0.0005$ ).

Pour l'interaction des deux facteurs étudiés, le test Newman-Keuls a classé les différentes moyennes en neuf groupes homogènes (Tableau 3.5). En analysant ces résultats nous constatons que chez la première variété (Nedjma) la bactérisation se distingue nettement du témoin et montre un effet positif sur le poids frais. Les plants traités ont présenté les meilleurs résultats (1.37 à 1.62 g) par rapport au témoin (1.34 g).

Pour la deuxième variété (Agora), les moyennes obtenues avec les souches CHAO et S20 (1.36 g) appartiennent au même groupe, elles sont largement supérieures aux valeurs enregistrées chez le témoin (1.30 g) qui appartient à un autre groupe différent (CDE). Nous avons constaté que la bactérisation avec la souches S20 a donné des résultats de poids frais significatifs (1.52 g, 1.36 g) par rapport aux témoins, en montrant une stabilité avec les deux variétés (Tableau 3.5).

Pour l'effet simple de la bactérisation en se référant au même test (Newman-Keuls), les six traitements sont classées en trois groupes homogènes A, AB et B. Les plants traités avec les souches C7R12, S20, CHAO et CK4 sont d'un poids frais meilleur (1.34 à 1.44 g) que celui du témoin (1.32 g) (Figure 3.7).

Tableau 3.3 : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le nombre de feuilles

Traitements	Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
<b>Période 1 30 jours**</b>	8,02 ± 0,93 BC*	8,13 ± 0,86 BC	9,18 ± 0,22 AB	9,33 ± 0,45 AB	9,11 ± 0,32 AB	9,66 ± 0,54 A	8,54 ± 0,41 ABC	7,54 ± 0,40 C	8,13 ± 0,65 BC	8,95 ± 0,41 ABC	8,12 ± 0,90 BC	7,90 ± 0,51 BC
<b>Période 2 37 jours</b>	7,33 ± 0,54	6,88 ± 0,37	6,95 ± 0,80	7,45 ± 0,24	7,20 ± 0,46	7,50 ± 0,72	7,12 ± 0,38	6,58 ± 0,32	6,83 ± 0,56	7,04 ± 0,22	6,29 ± 0,54	6,37 ± 0,30
<b>Période 3 44 jours</b>	11,20 ± 1,65	11,70 ± 1,95	10,24 ± 1,70	11,67 ± 0,81	11,58 ± 1,76	11,20 ± 2,15	12,17 ± 0,91	10,29 ± 2,06	10,66 ± 1,74	11,95 ± 0,53	10,87 ± 2,23	9,93 ± 1,35

\* les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au risque d'erreur  $\alpha$  5% selon le test Newman-Keuls

\*\* Nombre de jours après la transplantation des plantules au niveau de la serre

Tableau 3.4. : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le diamètre des tiges (cm)

Traitements	Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
<b>Période 1 44 jours* (cm)</b>	0,73 ± 0,14	0,73 ± 0,14	0,77 ± 0,08	0,91 ± 0,13	0,83 ± 0,13	0,80 ± 0,16	0,80 ± 0,05	0,69 ± 0,10	0,85 ± 0,06	0,87 ± 0,01	0,74 ± 0,11	0,71 ± 0,05
<b>Période 2 138 jours (cm)</b>	1,40 ± 0,14	1,54 ± 0,12	1,43 ± 0,15	1,53 ± 0,14	1,50 ± 0,12	1,49 ± 0,05	1,29 ± 0,12	1,33 ± 0,08	1,36 ± 0,08	1,38 ± 0,15	1,28 ± 0,09	1,29 ± 0,10

\* Nombre de jours après la transplantation des plantules au niveau de la serre

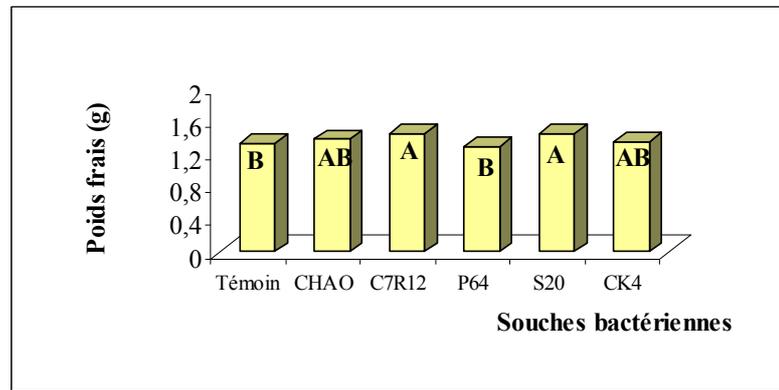


Figure 3.7 : Effet de la bactérisation sur le poids frais de la partie aérienne

#### 3.1.2.5.2 Poids sec

Pour le poids sec de la partie aérienne, l'analyse de la variance a montré des différences non significatives entre les traitements bactérisés et le témoin pour l'effet de l'interaction des deux facteurs étudiés ( $P = 0.0545$ ) et pour l'effet simple des souches bactériennes ( $P = 0.0634$ ) (Tableau 3.5).

#### 3.1.2.6 Poids frais et sec de la partie souterraine

##### 3.1.2.6.1 Première période : avant transplantation

L'analyse de la variance effectuée sur les résultats du poids frais des racines a révélé une différence significative entre les traitements pour l'effet simple des souches bactériennes ( $P = 0.0209$ ). Le même résultat d'analyse est obtenu quant au paramètre du poids sec des racines où la différence entre les traitements bactérisés et non bactérisés était significative avec une probabilité de 0.0040.

Les différences pouvant exister entre les résultats des douze traitements pour l'interaction de la bactérisation avec les variétés demeure non significative pour les deux paramètres respectivement ( $P = 0.0828$  et  $0.1140$ ). Avec le test Newman-Keuls nous avons pu classer les six moyennes en trois groupes homogènes à savoir A, AB et B. Selon ces résultats les plants bactérisés ont présenté des poids frais meilleurs que ceux du témoin (Figure 3.8).

Tableau 3.5 : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le poids frais et le poids sec de la partie aérienne et souterraine (g)

Traitements		Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
		Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
Partie aérienne (stade pépinière) (g)	poids frais	1,34 ± 0,09 CDE*	1,37 ± 0,06 BCDE	1,62 ± 0,11 A	1,41 ± 0,09 BCD	1,52 ± 0,13 AB	1,45 ± 0,08 BC	1,30 ± 0,04 CDE	1,36 ± 0,04 BCDE	1,26 ± 0,03 DEF	1,16 ± 0,06 F	1,36 ± 0,16 BCDE	1,23 ± 0,05 EF
	poids sec	0,13 ± 0,02	0,14 ± 0,02	0,15 ± 0,02	0,15 ± 0,02	0,16 ± 0,02	0,14 ± 0,02	0,14 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,12 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,15 ± 0,02	0,13 ± 0,01
Partie souterraine (stade pépinière) (g)	poids frais	0,47 ± 0,10	0,58 ± 0,09	0,59 ± 0,07	0,56 ± 0,12	0,47 ± 0,12	0,42 ± 0,14	0,40 ± 0,02	0,52 ± 0,08	0,48 ± 0,08	0,42 ± 0,04	0,47 ± 0,03	0,49 ± 0,04
	poids sec	0,06 ± 0,02	0,07 ± 0,02	0,06 ± 0,02	0,07 ± 0,02	0,06 ± 0,02	0,04 ± 0,01	0,05 ± 0,00	0,09 ± 0,02	0,07 ± 0,02	0,06 ± 0,01	0,06 ± 0,02	0,06 ± 0,01
Partie souterraine (138 j**) (g)	poids frais	81,43 ± 6,15	75,34 ± 11,76	74,97 ± 13,98	68,22 ± 7,32	75,17 ± 6,79	70,68 ± 8,46	69,04 ± 10,14	67,73 ± 4,84	58,49 ± 2,48	72,80 ± 9,05	81,38 ± 14,54	70,78 ± 10,04
	poids sec	13,54 ± 1,78	14,38 ± 0,97	11,52 ± 2,11	11,89 ± 1,22	14,33 ± 1,79	11,64 ± 1,34	12,51 ± 1,42	13,80 ± 2,36	11,54 ± 1,60	13,35 ± 2,24	14,60 ± 2,48	13,18 ± 4,71

\* les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au risque d'erreur  $\alpha$  5% selon le test Newman-Keuls

\*\* Nombre de jours après la transplantation des plantules au niveau de la serre

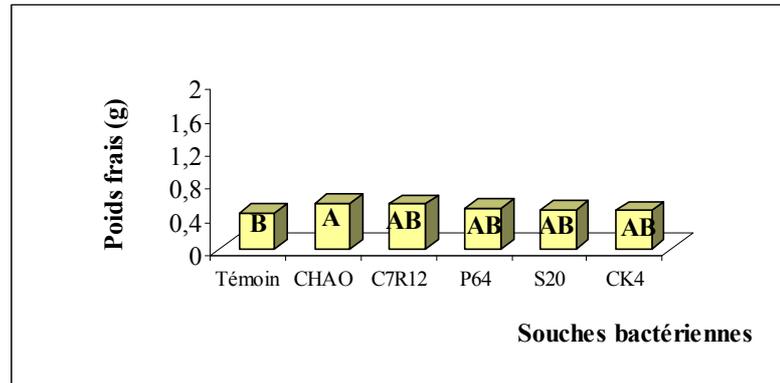


Figure 3.8 : Effet de la bactérisation sur le poids frais de la partie souterraine

C'est aussi le cas pour la biomasse sèche où trois groupes homogènes (A, AB, B) ont été définis par le test Newman-Keuls. Ces résultats ont montré la supériorité des plants bactérisés avec les quatre souches suivantes CHAO (0.08 g), C7R12 (0.07 g), P64 et S20 (0.06 g) par rapport au témoin (0.05 g) (Figure 3.9).

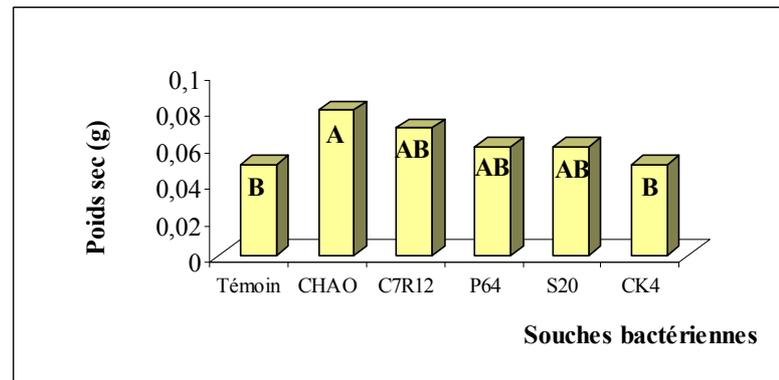


Figure 3.9 : Effet de la bactérisation sur le poids sec de la partie souterraine

#### 3.1.2.6.2 Deuxième période : fin de culture

L'analyse de la variance relative à la biomasse (fraîche et sèche) de la partie souterraine, après 138 jours de la transplantation a montré une différence non significative entre les traitements, que ce soit pour l'effet simple des bactéries ( $P = 0.2711, 0.1400$ ) ou pour l'effet de l'interaction des deux facteurs étudiés ( $P = 0.1428, 0.8369$ ) (Tableau 3.5).

Notons que des plants bactérisés avec certaines souches bactériennes ont présenté des valeurs supérieures à celles du témoin, néanmoins ces amplitudes restent non significatives.

### 3.1.3 Paramètres de floraison

#### 3.1.3.1 Nombre de bouquets floraux

Le suivi du nombre des bouquets floraux a été réalisé en plusieurs périodes durant le cycle de la culture (66 jours, 96 jours et 138 jours après la date de la transplantation). L'analyse de la variance des données recueillies démontre l'absence d'une signification entre les différences notées aussi bien pour l'effet simple des souches bactériennes ( $P = 0.5542, 0.3884, 0.3111$ ) que pour celui de l'interaction des deux facteurs étudiés ( $P = 0.6964, 0.6528, 0.7672$ ) (Tableau 3.6).

#### 3.1.3.2 Nombre et diamètre des fruits noués

Le nombre de fruits noués et leur diamètre ont été comptés chaque semaine pendant une période d'un mois (Tableau 3.7).

Selon l'analyse de la variance des résultats de ces deux paramètres, l'interaction de l'effet de la bactérisation et des deux variétés a révélé une différence non significative avec une probabilité variant de 0.3788 à 0.7252 pour le premier paramètre et de 0.1580 à 0.7998 pour le deuxième. L'effet simple de la bactérisation a également montré une différence non significative entre les plants bactérisés et non bactérisés ( $P = 0.1653$  à  $0.9692$ ).

### 3.1.4 Production de fruits

Pour l'étude de l'effet de la bactérisation sur la biostimulation de la production de fruits de tomate ; une récolte sur deux a été analysée, donc sept périodes de production ont été examinées (Figure 3.4). Il faut rappeler que l'entrée en production des fruits a débuté après 98 jours de la transplantation des plantules au niveau de la serre. L'étude de la première récolte a été réalisée après 08 jours de cette date, après stabilisation de la récolte.

La figure 3.10, montre la supériorité de l'effet de certaines souches sur la production en fruit par rapport au témoin non traité en période de pleine production.

Tableau 3.6 : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le nombre de bouquets floraux

Traitements	Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
<b>Période 1 66 jours*</b>	4,15 ± 0,82	4,04 ± 0,63	3,82 ± 0,69	4,62 ± 0,21	4,54 ± 0,55	4,33 ± 1,06	4,04 ± 0,25	3,45 ± 0,56	3,87 ± 0,79	4,04 ± 0,21	3,66 ± 0,63	3,62 ± 0,44
<b>Période 2 96 jours</b>	8,74 ± 0,74	8,33 ± 0,62	8,22 ± 1,41	9,58 ± 0,83	9,12 ± 0,35	8,96 ± 1,01	8,42 ± 0,47	8,17 ± 0,48	7,83 ± 1,52	8,37 ± 0,45	7,83 ± 0,66	7,88 ± 0,47
<b>Période 3 138 jours</b>	13,31 ± 0,66	13,08 ± 1,53	13,14 ± 1,33	14,38 ± 1,06	14,12 ± 1,09	13,74 ± 1,58	12,54 ± 0,37	11,91 ± 0,97	12,70 ± 1,05	13,19 ± 0,46	12,08 ± 0,53	12,51 ± 0,73

\* Nombre de jours après la transplantation des plantules au niveau de la serre

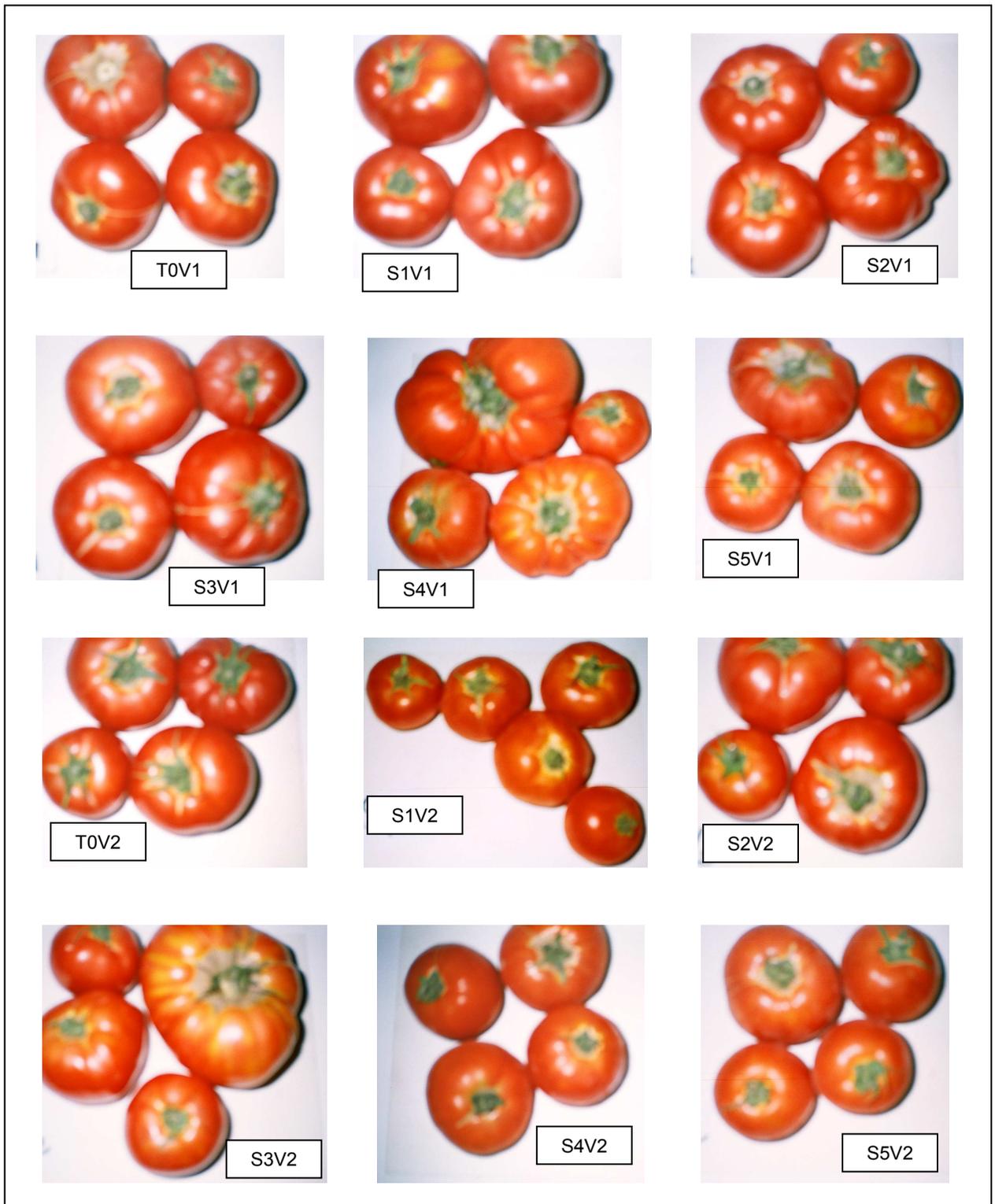
Tableau 3.7 : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le nombre et le diamètre des fruits noués (cm)

Traitements		Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
		Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
Période 1 64 jours *	1**	0,66 ± 0,77	0,25 ± 0,45	0,50± 1,04	0,75 ± 0,41	0,38 ± 0,70	0,75 ± 0,57	1,16 ± 0,80	0,25 ± 0,55	0,88 ± 0,56	1,34 ± 0,34	1,17 ± 0,23	0,50 ± 0,62
	2***	0,92 ± 0,91	0,44 ± 0,91	0,63 ± 1,22	1,44 ± 0,78	0,56 ± 1,16	2,00 ± 1,54	1,06 ± 0,76	0,44 ± 0,85	1,27 ± 0,90	1,94 ± 0,38	1,72 ± 0,49	0,50 ± 0,76
Période 2 70 jours	1	0,63 ± 0,56	0,50 ± 0,61	1,00± 1,13	1,16 ± 0,40	0,58 ± 0,87	1,00 ± 0,30	2,23 ± 0,60	1,75 ± 0,52	1,67 ± 0,69	1,92 ± 0,43	1,88 ± 0,50	1,83 ± 0,86
	2	1,38 ± 1,37	0,88 ± 1,21	0,88 ± 0,98	2,10 ± 0,77	1,35 ± 1,67	2,58 ± 1,33	2,20 ± 0,31	1,85 ± 0,64	1,81 ± 0,84	2,38 ± 0,56	2,20 ± 0,36	1,87 ± 0,42
Période 3 82 jours	1	2,56 ± 1,63	2,20 ± 0,37	1,20± 0,60	1,56 ± 0,44	2,05 ± 0,67	1,96 ± 1,68	5,57 ± 1,12	4,51 ± 0,21	4,95 ± 1,70	4,91 ± 0,84	7,20 ± 0,78	5,40 ± 2,42
	2	2,18 ± 0,80	2,36 ± 0,92	2,05 ± 0,87	2,71 ± 0,80	2,78 ± 0,87	2,50 ± 1,23	2,44 ± 0,07	1,98 ± 0,06	2,41 ± 0,54	2,41 ± 0,06	2,30 ± 0,26	2,45 ± 0,41
Période 4 92 jours	1	5,26 ± 1,60	5,46 ± 0,56	4,15± 1,14	4,08 ± 1,14	5,66 ± 1,58	4,23 ± 3,31	11,25 ± 1,40	9,62 ± 1,11	10,70± 1,12	10,87± 1,18	12,95± 1,15	10,85± 1,68
	2	3,17 ± 0,61	3,26 ± 0,16	3,04 ± 0,17	3,10 ± 0,20	3,18 ± 0,57	3,06 ± 0,51	3,30 ± 0,18	3,15 ± 0,22	3,38 ± 0,18	3,44 ± 0,37	3,44 ± 0,09	3,27 ± 0,19

\* Nombre de jours après la transplantation des plantules au niveau de la serre

\*\* Nombre des fruits noués par plant

\*\*\* Diamètre moyen des fruits noués par plant (cm)



Echelle  
8 cm

Figure 3.10 : Présentation des fruits de tomate récoltés en pleine production selon les traitements étudiés

T<sub>0</sub>: Témoin    S<sub>1</sub>: CHAO    S<sub>2</sub>: C7R12    S<sub>3</sub>: P64    S<sub>4</sub>: S20    S<sub>5</sub>: CK4  
                   V<sub>1</sub>: Variété NEDJMA    V<sub>2</sub>: Variété AGORA

#### 3.1.4.1 Poids moyen du fruit

A l'exception de la cinquième récolte, l'analyse de la variance du poids moyen des fruits de tomate a montré des différences non significatives entre les traitements ( $P > 0.06$ ), malgré une légère supériorité des résultats présentés par les plants bactérisés par rapport aux plants témoins.

Particulièrement, pour la 5<sup>ème</sup> récolte (40 jours après l'entrée en production), les différences notées entre les traitements étaient significatives pour l'effet des souches bactériennes et leur interaction avec les variétés de tomate ( $P = 0.0038$  et  $0.0363$ ). Les différentes moyennes sont, de ce fait, classées selon le test Newman-Keuls en plusieurs groupes homogènes, (Figure 3.11).

Pour l'interaction des deux facteurs quatre groupes homogènes sont ainsi déterminés : A, AB, BC et C. L'analyse de ces résultats a montré pour la variété Nedjma, la supériorité de l'effet de deux souches bactériennes C7R12 (224.17 g) et P64 (193.21 g) par rapport au témoin (138.20 g). Les moyennes obtenues par l'application de ces souches appartiennent à des groupes différents (A, AB) distincts de celui du témoin (BC). Pour la variété Agora, les différences notées ne sont pas significatives puisque les moyennes des six traitements appartiennent au même groupe homogène BC (Tableau 3.8).

Pour l'effet simple des bactéries, en se référant toujours aux résultats du test Newman-Keuls, trois groupes homogènes sont obtenus A, AB et B. Les meilleurs résultats en poids moyen des fruits (178.71 g, 165.99 g, 152.35 g) sont notés chez les plants bactérisés respectivement avec C7R12, P64 et CHAO et occupent par conséquent les deux premiers groupes. Le témoin quant à lui avec une valeur de 131.89 g appartient au dernier groupe avec les moyennes présentées par les souches CK4 et S20 (Figure 3.11).

Tableau 3.8 : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le poids moyen des fruits (g)

Traitements	Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
<b>Récolte 1</b>	12,77	0,00	0,00	22,41	0,00	4,79	100,93	48,61	89,49	73,51	113,02	108,14
<b>08 jours**</b>	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
<b>(g)</b>	34,03	19,90	19,0	26,44	19,90	11,09	20,44	49,66	49,91	13,24	2,54	25,09
<b>Récolte 2</b>	63,65	73,29	60,38	82,50	28,31	47,73	80,87	84,37	112,09±	106,24	115,63	107,78
<b>15 jours</b>	±	±	±	±	±	±	±	±	16,68	±	±	±
<b>(g)</b>	72,49	39,53	62,86	110,04	66,53	60,35	54,10	24,58		32,22	18,03	21,37
<b>Récolte 3</b>	231,03	253,35	221,73	255,83	287,73	256,83	178,39	166,27	156,58 ±	164,46	159,40	156,96
<b>28 jours</b>	±	±	±	±	±	±	±	±	25,87	±	±	±
<b>(g)</b>	36,69	18,35	43,21	29,21	39,48	32,18	19,46	28,10		14,34	18,19	16,24
<b>Récolte 4</b>	223,02	216,39	230,72	241,65	213,90	222,50	184,67	175,92	211,57	190,42	219,89	193,63
<b>34 jours</b>	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
<b>(g)</b>	52,08	23,36	47,94	26,51	34,47	66,12	26,40	35,70	7,54	22,99	26,24	33,64
<b>Récolte 5</b>	<b>138,20</b>	<b>165,67</b>	<b>224,17</b>	<b>193,21</b>	<b>115,29</b>	<b>134,24</b>	<b>125,59</b>	<b>139,04</b>	<b>133,25 ±</b>	<b>138,77</b>	<b>126,66</b>	<b>121,66</b>
<b>40 jours</b>	±	±	±	±	±	±	±	±	<b>24,93</b>	±	±	±
<b>(g)</b>	<b>31,55</b>	<b>16,21</b>	<b>14,92</b>	<b>45,23</b>	<b>19,92</b>	<b>62,55</b>	<b>7,21</b>	<b>36,67</b>	<b>BC</b>	<b>10,33</b>	<b>27,13</b>	<b>5,76</b>
	<b>BC*</b>	<b>BC</b>	<b>A</b>	<b>AB</b>	<b>C</b>	<b>BC</b>	<b>BC</b>	<b>BC</b>		<b>BC</b>	<b>BC</b>	<b>BC</b>
<b>Récolte 6</b>	196,11	214,46	248,51	190,08	169,67	130,35	133,95	160,91	156,18	140,06	150,48	176,01
<b>43 jours</b>	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
<b>(g)</b>	8,39	48,88	44,43	17,90	44,54	92,08	27,19	15,29	25,44	21,73	42,25	45,07
<b>Récolte 7</b>	195,72	180,78	218,92	207,29	181,63	233,41	149,83	151,03	148,27	151,94	158,80	149,96
<b>48 jours</b>	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
<b>(g)</b>	16,80	36,61	34,72	15,60	11,50	51,05	12,92	25,77	15,76	22,12	18,74	21,51

\* les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au risque d'erreur  $\alpha$  5% selon le test Newman-Keuls

\*\* Nombre de jours après l'entrée en production des fruits

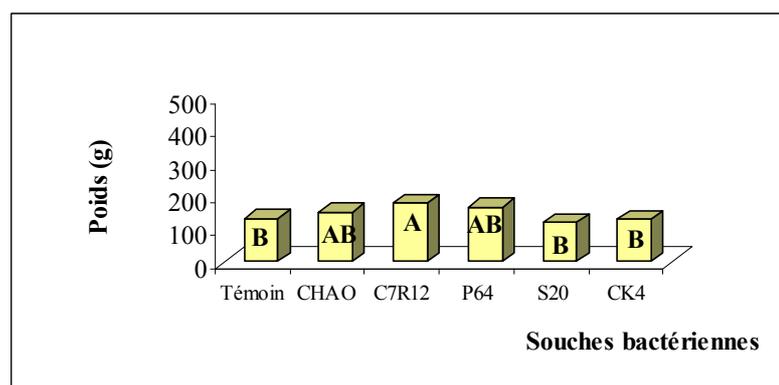


Figure 3.11 : Effet de la bactérisation sur le poids moyen du fruit par plant (Récolte 5)

#### 3.1.4.2 Diamètre moyen du fruit

Malgré la supériorité des résultats du diamètre moyen des fruits dont les plants étaient bactérisés, l'analyse de la variance n'a pas révélé une différence significative par rapport au témoin pour les sept dates de récolte ( $P > 0.08$ ) (Tableau 3.9).

#### 3.1.4.3 Poids total des fruits par plant

L'analyse de la variance effectuée sur le poids total des fruits par plant a montré des différences significatives entre les traitements durant la première, la cinquième et la sixième récolte.

Pour la première récolte (08 jours après l'entrée en production), la signification des différences enregistrées concerne uniquement l'interaction des souches bactériennes avec les deux variétés ( $P = 0.0146$ ).

Le test Newman-Keuls nous a permis de classer les douze traitements en six groupes homogènes. L'analyse de ce classement montre que les moyennes se référant à la variété Nedjma se rassemblent toutes dans le même groupe homogène D au sein duquel les différences notées parfois en faveur de certaines souches sont non significatives. Pour la variété Agora les plants traités avec les souches S20 et CK4 se distinguent nettement du témoin (100.93 g) avec des valeurs respectives de 158.82 g, 137.42 g (Tableau 3.10).

Tableau 3.9 : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le diamètre moyen des fruits (cm)

Traitements	Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
<b>Récolte 1</b> <b>08 jours*</b> <b>(cm)</b>	1,13 ± 2,38	0,00 ± 0,74	0,00 ± 0,74	1,46 ± 2,23	0,00 ± 0,74	0,88 ± 1,08	5,71 ± 0,40	2,81 ± 3,02	4,60 ± 2,78	5,38 ± 0,63	5,86 ± 0,70	5,78 ± 0,47
<b>Récolte 2</b> <b>15 jours</b> <b>(cm)</b>	3,19 ± 3,52	4,35 ± 2,45	3,31 ± 3,22	3,34 ± 3,63	1,56 ± 3,36	2,91 ± 3,37	4,38 ± 2,55	5,56 ± 0,86	6,07 ± 0,86	5,93 ± 1,01	6,10 ± 0,63	5,95 ± 0,87
<b>Récolte 3</b> <b>28 jours</b> <b>(cm)</b>	8,08 ± 0,65	8,66 ± 0,50	7,92 ± 0,71	8,23 ± 0,43	8,68 ± 0,59	8,36 ± 0,39	7,18 ± 0,25	6,99 ± 0,41	6,89 ± 0,52	6,90 ± 0,26	6,97 ± 0,32	6,73 ± 0,26
<b>Récolte 4</b> <b>34 jours</b> <b>(cm)</b>	7,06 ± 0,49	7,17 ± 0,34	7,22 ± 0,56	7,76 ± 0,39	7,31 ± 0,31	7,21 ± 0,68	6,71 ± 0,30	6,55 ± 0,54	7,28 ± 0,19	6,75 ± 0,25	7,20 ± 0,38	6,84 ± 0,34
<b>Récolte 5</b> <b>40 jours</b> <b>(cm)</b>	6,34 ± 0,35	6,79 ± 0,21	7,24 ± 0,12	6,86 ± 0,73	6,21 ± 0,11	6,05 ± 1,02	6,03 ± 0,37	6,05 ± 0,62	5,98 ± 0,54	6,53 ± 0,06	6,28 ± 0,31	6,09 ± 0,28
<b>Récolte 6</b> <b>43 jours</b> <b>(cm)</b>	6,94 ± 0,14	7,02 ± 0,57	7,50 ± 0,43	6,87 ± 0,12	6,57 ± 0,35	5,07 ± 3,09	6,01 ± 0,56	6,44 ± 0,38	6,28 ± 0,40	6,06 ± 0,47	6,41 ± 0,67	6,60 ± 0,72
<b>Récolte 7</b> <b>48 jours</b> <b>(cm)</b>	6,92 ± 0,26	6,63 ± 0,63	7,42 ± 0,29	6,90 ± 0,32	6,75 ± 0,19	7,02 ± 0,52	6,22 ± 0,15	6,08 ± 0,16	6,23 ± 0,22	6,11 ± 0,18	6,27 ± 0,21	6,17 ± 0,33

\* Nombre de jours après l'entrée en production des fruits

Tableau 3.10 : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le poids des fruits par plant (g)

Traitements	Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
	Témoin	CHAO	C7R1 2	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
<b>Récolte 1 jours** (g)</b>	12,77 ± 35,25 D*	0,00 ± 22,85 D	0,00 ± 22,85 D	31,78 ± 42,37 D	0,00 ± 22,85 D	4,79 ± 14,03 D	100,93 ± 19,81 ABC	48,61 ± 48,50 CD	106,28 ± 63,58 ABC	73,51 ± 15,40 BCD	158,82 ± 34,34 A	137,42 ± 30,46 AB
<b>Récolte 2 15 jours (g)</b>	63,65 ± 87,32	145,4 ± 106,74	60,38 ± 66,32	82,50 ± 106,98	28,31 ± 56,22	61,86 ± 98,33	129,69 ± 66,51	133,0 ± 103,53	173,64 ± 37,22	171,6 ± 39,80	206,37 ± 56,56	240,80 ± 60,15
<b>Récolte 3 28 jours (g)</b>	694,89 ± 198,15	838,33 ± 183,42	527,56 ± 223,59	592,78 ± 47,58	624,26 ± 198,71	707,48 ± 280,49	634,22 ± 368,39	498,68 ± 99,98	796,52 ± 181,69	536,94 ± 59,70	611,32 ± 146,30	524,61 ± 119,62
<b>Récolte 4 34 jours (g)</b>	454,64 ± 83,49	299,10 ± 41,87	479,55 ± 145,95	393,98 ± 164,96	590,57 ± 121,89	462,59 ± 64,01	716,39 ± 253,06	675,44 ± 75,14	679,78 ± 117,11	731,82 ± 133,30	783,58 ± 154,69	745,31 ± 240,28
<b>Récolte 5 40 jours (g)</b>	263,62 ± 56,82	387,30 ± 65,08	412,87 ± 80,81	375,99 ± 111,57	215,18 ± 16,66	134,24 ± 60,59	282,53 ± 92,79	330,52 ± 64,49	366,29 ± 97,22	318,43 ± 48,88	234,01 ± 87,87	233,83 ± 32,94
<b>Récolte 6 43 jours (g)</b>	469,87 ± 177,82	489,01 ± 161,39	609,86 ± 210,37	585,66 ± 83,64	448,32 ± 109,75	227,79 ± 59,87	345,79 ± 61,53	482,48 ± 75,83	599,21 ± 112,73	347,90 ± 97,44	386,52 ± 133,28	320,20 ± 58,54
<b>Récolte 7 48 jours (g)</b>	535,88 ± 291,52	413,58 ± 91,97	550,54 ± 166,32	841,89 ± 98,59	595,44 ± 58,56	630,08 ± 225,99	1000,33 ± 177,04	785,00 ± 199,99	747,67 ± 98,66	834,04 ± 194,45	920,83 ± 238,50	871,50 ± 313,44

\* les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au risque d'erreur  $\alpha$  5% selon le test Newman-Keuls

\*\* Nombre de jours après l'entrée en production des fruits

Pour la cinquième récolte, 40 jours après l'entrée en production, selon le test Newman-Keuls les six moyennes sont classées en quatre groupes homogènes A, AB, BC et C.

Les souches C7R12, CHAO et P64 semblent stimuler significativement le poids des fruits en présentant de meilleurs résultats (389.58 g, 358.91 g, 347.21 g) comparé aux plants témoins (273.07 g). Notons aussi que les moyennes obtenues par les plants bactérisés avec ces trois souches appartiennent à des groupes (A, AB) différents de celui qui renferme le témoin (BC) (Figure 3.12).

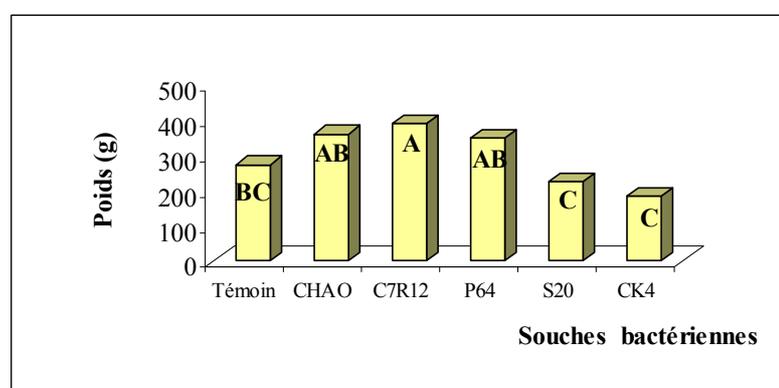


Figure 3.12 : Effet de la bactérisation sur le poids des fruits produits par plant (Récolte 5)

Pour la sixième récolte, 43 jours après l'entrée en production, le même constat que celui de la cinquième récolte a été noté. L'analyse de la variance ayant révélée une différence nettement significative ( $P = 0.0006$ ) pour l'effet simple des bactéries sur ce paramètre, les différentes moyennes sont classées par le test Newman-Keuls en quatre groupes homogènes (A, AB, BC et C).

Ce sont également les souches C7R12, CHAO et P64 qui ont induit l'effet le plus marqué en présentant des poids de fruits (604.54 g, 485.75 g et 466.78 g) nettement supérieurs à ceux des plants non bactérisés (407.83 g). Les moyennes des plants traités avec ces souches se classent dans des groupes homogène différents (A, AB) que celui du témoin (BC). En revanche ce n'est pas le cas de la souche S20, bien que donnant une valeur supérieure à celle du témoin 417.42 g, appartient au groupe BC ainsi cette supériorité demeure non significative (Figure 3.13).

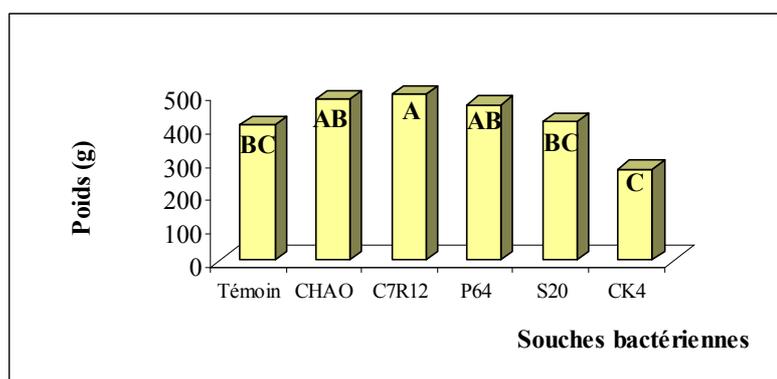


Figure 3.13 : Effet de la bactérisation sur le poids des fruits produits par plant (Récolte 6)

#### 3.1.4.4 Poids frais et sec des fruits

L'analyse de la variance réalisée sur les poids moyens frais et sec des fruits a montré une différence non significative entre les plants bactérisés et les plants témoins (Tableau 3.11).

Pour le poids frais malgré la supériorité de l'effet de certaines souches les résultats restent non significatifs. Les probabilités obtenues sont de 0.7117 pour l'effet simple des souches bactériennes et de 0.5241 pour l'interaction de la bactérisation avec les deux variétés. Pour le poids sec, certains plants bactérisés ont présenté des valeurs élevées par rapport au témoin mais ne semble pas être stimuler significativement puisque les probabilités de l'effet simple ( $P = 0.7242$ ) et de l'interaction des deux facteurs étudiés ( $P = 0.6972$ ) sont largement supérieures à 0.05.

#### 3.1.5 Dosages des protéines totales

L'analyse de la variance des quantités de protéines totales obtenues à partir des feuilles (pour les deux dates de dosages) et des fruits a révélé des différences hautement significatives ( $P = 0.00$ ) entre les traitements bactérisés et le témoin.

##### 3.1.5.1 Dosages des protéines totales à partir des feuilles

Le test Newman-Keuls nous a permis de classer les douze moyennes obtenus lors de la première date du dosage, 50 jours après la transplantation, en quatre groupes homogènes A, AB, B et C (Tableau 3.12).

Pour la variété Nedjma la moyenne la plus élevée a été obtenue avec la souche P64 qui appartient au premier groupe (A). Cependant ce groupe renferme également le témoin et la moyenne de la souche CHAO de ce fait la supériorité des plants traités avec la souche P64 ne peut être considérée comme significative. Donc pour cette variété la bactérisation ne semble pas montrer un effet notable sur la quantité des protéines totales. Pour la deuxième variété les traitements bactérisés, où les valeurs enregistrées varient de 2.80mg/ml à 2.91 mg/ml (AB et B), se distinguent nettement du témoin (2.71mg/ml) qui appartient au dernier groupe.

Pour la deuxième date de dosage, 100 jours après la transplantation, en se basant sur le test Newman-Keuls, les douze moyennes obtenues de l'interaction des deux facteurs étudiés, ont été classées en dix groupes homogènes (Tableau 3.12).

Pour la première variété les souches C7R12 et P64 avec des valeurs de 3.03 mg/ml et 2.81 mg/ml respectivement, se distinguent nettement du témoin (2.74 mg/ml) par leur effet apparent sur la quantité des protéines totales au niveau des feuilles. Les cinq souches bactériennes appliquées aux plants de la variété Agora semblent stimuler significativement la quantité des protéines totales. Chez ces plants, les valeurs en protéines notées varient de 2.46 mg/ml à 2.91 mg/ml, elles sont supérieures à celle du témoin (2.37 mg/ml) (Tableau 3.12).

Concernant l'effet simple des souches bactériennes, selon le test Newman-Keuls les six moyennes sont réparties en six groupes homogènes (Figure 3.14). Les plants traités avec les souches P64 (2.86 mg/ml), C7R12 (2.75 mg/ml) et CHAO (2.68 mg/ml) ont montré clairement leur supériorité par rapport au témoin (2.55 mg/ml).

#### 3.1.5.2 Dosage des protéines totales à partir des fruits

D'après les résultats du test Newman-Keuls huit groupes homogènes ont été obtenus (Tableau 3.12). Pour la première variété (Nedjma), les meilleurs résultats ; 0.46 mg/ml et 0.43 mg/ml sont respectivement enregistrés chez les plants traités avec les souches CK4 (A) et CHAO (B), alors que la valeur enregistré chez le témoin est de 0.40 mg/ml (BC).

Tableau 3.11 : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le poids frais et sec (g) des fruits en période de pleine production (récolte 4)

Traitements	Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
<b>Poids frais des fruits (g)</b>	189,70	172,86	169,92	183,55	172,58	182,11	153,84	159,62	165,36 ±	170,67	165,84	172,00
	± 19,20	± 19,78	± 17,97	± 15,80	± 12,26	± 21,73	± 13,64	± 31,86	11,69	± 5,11	± 23,68	± 24,95
<b>Poids sec des fruits (g)</b>	13,55	14,60	12,42	15,27	12,10	14,21	9,26	10,72	9,53	10,12	11,41	11,03
	± 3,70	± 4,09	± 1,92	± 2,99	± 3,44	± 3,36	± 1,15	± 4,32	± 1,70	± 0,77	± 3,68	± 3,62

Tableau 3.12 : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le taux de protéines totales (mg/ml)

Traitements		Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
		Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
<b>Feuilles (mg/ml)</b>	<b>1<sup>er</sup> dosage 50 jours**</b>	2,96 ± 0,09 A*	2,92 ± 0,02 A	2,90 ± 0,02 AB	2,97 ± 0,01 A	2,87 ± 0,01 AB	2,89 ± 0,02 AB	2,71 ± 0,02 C	2,90 ± 0,08 AB	2,90 ± 0,02 AB	2,80 ± 0,07 B	2,91 ± 0,01 AB	2,89 ± 0,01 AB
	<b>2<sup>ème</sup> dosage 100 jours</b>	2,74 ± 0,02 D	2,72 ± 0,02 D	3,03 ± 0,04 A	2,81 ± 0,01 C	2,47 ± 0,02 H	2,41 ± 0,01 I	2,37 ± 0,02 J	2,63 ± 0,01 F	2,46 ± 0,01 H	2,91 ± 0,02 B	2,58 ± 0,02 G	2,66 ± 0,02 E
<b>Fruits (mg/ml)</b>		0,40 ± 0,01 BC	0,43 ± 0,01 B	0,38 ± 0,01 C	0,26 ± 0,01 F	0,36 ± 0,01 CD	0,46 ± 0,03 A	0,37 ± 0,05 CD	0,38 ± 0,02 C	0,29 ± 0,01 E	0,30 ± 0,01 E	0,40 ± 0,01 BC	0,34 ± 0,01 D

\* les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au risque d'erreur  $\alpha$  5% selon le test Newman-Keuls

\*\* Nombre de jours après la transplantation des plantules au niveau de la serre

Pour la deuxième variété (Agora), les plants bactérisés avec les souches CHAO (0.40 mg/ml) et S20 (0.38 mg/ml) ont montré une légère supériorité par rapport au témoin (0.37 mg/ml) qui appartient à un groupe différent (CD) selon le Tableau 3.12. D'après ces résultats nous pouvons aisément distinguer la supériorité de la souche CHAO qui a montré un effet positif chez les deux variétés, contrairement aux souches CK4 et S20.

Concernant l'effet simple des bactéries, le test Newman-Keuls ne révèle pas un effet positif sur ce paramètre, en effet bien que les plants traités avec certaines souches (CHAO et CK4) ont montré une légère supériorité par rapport au témoin, leurs moyennes appartiennent à un groupe homogène identique (A) au sein duquel la différence est non significative (Figure 3.14).

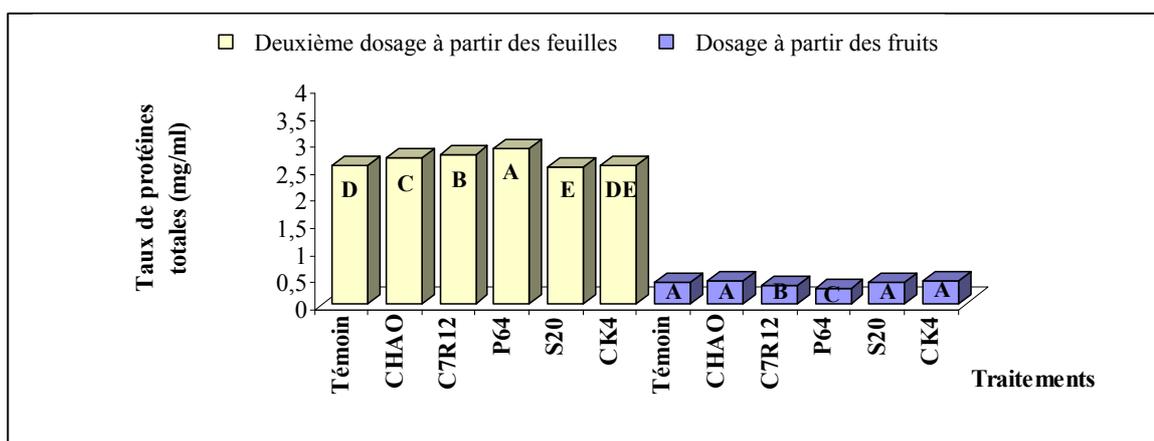


Figure 3.14 : Effet de la bactérisation sur le taux des protéines totales

## 3.2 Activité rhizosphérique

### 3.2.1 Dosage des éléments minéraux

#### 3.2.1.1 Dosage du Phosphore

L'analyse de la variance relative à la quantité du phosphore assimilable dans la rhizosphère a révélé une différence hautement significative entre les traitements pour l'interaction des deux facteurs étudiés et pour l'effet simple de la bactérisation.

Le test Newman-Keuls a classé les douze moyennes obtenues en six groupes homogènes (Tableau 3.13). Pour la variété Nedjma, les souches P64 et

CK4 semblent induire un effet significatif sur ce paramètre puisque les valeurs obtenues (270.33 ppm, 250.67 ppm) sont plus élevées que celles du témoin (211.67 ppm). Concernant la variété Agora, la bactérisation ne semble pas procurer un effet notable sur la quantité du phosphore assimilable car les différences notées entre les traitements sont non significatives par rapport au témoin.

Enfin nous constatons que les plants traités avec la souche P64 ont conservé leur supériorité par rapport aux autres traitements, mais uniquement chez la première variété. Notons également que les valeurs recueillies chez la variété Nedjma sont, dans l'ensemble, nettement plus faibles comparées à celles de la variété Agora.

Pour l'effet simple des souches bactériennes, le test Newman-Keuls a dégagé cinq groupes homogènes où il apparaît que seule la souche P64 (325.17ppm) a montré un effet notable en termes d'assimilation du phosphore (Figure 3.15).

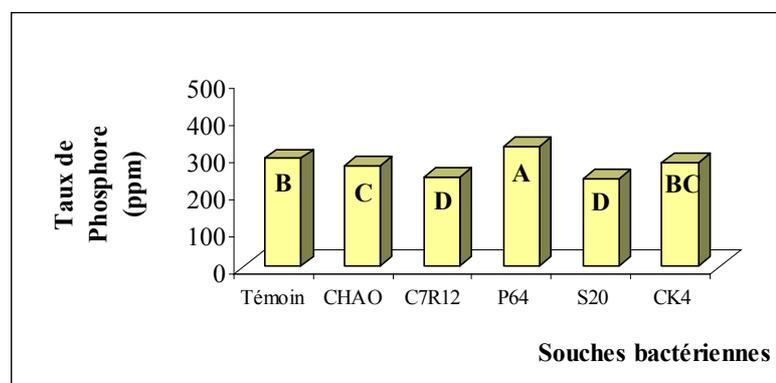


Figure 3.15 : Effet de la bactérisation sur l'assimilation du phosphore

### 3.2.1.2 Dosage du Potassium

Selon l'analyse de la variance effectuée sur les données de la quantité du potassium échangeable (dans la rhizosphère), une différence hautement significative entre les différents traitements a été établie. La signification des résultats est valable pour l'effet simple de la bactérisation et pour l'interaction des souches bactériennes avec les deux variétés.

Les douze moyennes sont traitées avec le test Newman-Keuls, elles sont réparties en huit groupes homogènes. La souche CK4 semble mieux stimuler l'assimilation du potassium ; en effet pour la variété Nedjma, les valeurs obtenues chez les plants traités avec cette souche (0.80 meq/100g de sol) sont nettement supérieures à celles du témoin (0.78 meq/100g de sol). Pour la deuxième variété la moyenne obtenue par l'effet de la souche CK4 (0.82 meq/100g de sol) appartient au premier groupe (A) et se distingue clairement du témoin (0.79 meq/100g de sol) qui occupe le groupe AB (Tableau 3.13).

Concernant l'effet simple des cinq souches bactériennes sur ce paramètre, le même constat a été noté, car les plants traités avec la souche CK4 (0.81 meq/100g de sol) ont présenté les meilleures moyennes (Figure 3.16).

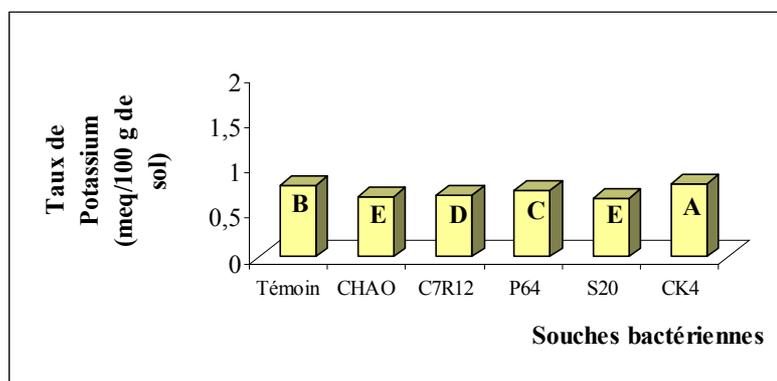


Figure 3.16 : Effet de la bactérisation sur l'assimilation du potassium

### 3.2.2 Colonisation racinaire

Il est utile de rappeler que la concentration initiale, après la dernière bactérisation, était théoriquement de l'ordre de  $10^6$  cfu/ml (pour les cinq souches). Après huit mois, durée du cycle de la culture de tomate, les densités bactériennes enregistrées varient de  $10^{14}$  à  $10^{23}$  cfu/g de sol suivant les souches bactériennes, la variété et l'échantillon utilisé (racine, sol rhizosphérique). Ceci dénote une forte augmentation des populations bactériennes dans la rhizosphère (Tableau 3.14), (Figure 3.17).

Tableau 3.13 : Effet de l'interaction (bactérisation x variétés de tomate) sur le taux du phosphore (ppm) et du potassium (meq/100g de sol)

Traitements	Variété Nedjma (V1)						Variété Agora (V2)					
	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
<b>Dosage du phosphore (ppm)</b>	211,67 ± 7,02 E*	203,00 ± 9,54 E	175,33 ± 14,05 F	270,33 ± 9,07 D	215,00 ± 5,57 E	250,67 ± 8,08 D	372,00 ± 14,93 A	340,33 ± 25,03 B	305,67 ± 4,51 C	380,00 ± 4,36 A	258,00 ± 7,00 D	309,33 ± 22,19 C
<b>Dosage du potassium (meq/100g de sol)</b>	0,78 ± 0,02 BC	0,58 ± 0,01 G	0,62 ± 0,02 F	0,77 ± 0,01 BC	0,61 ± 0,02 F	0,80 ± 0,02 AB	0,79 ± 0,02 AB	0,73 ± 0,01 D	0,75 ± 0,01 CD	0,69 ± 0,02 E	0,69 ± 0,02 E	0,82 ± 0,01 A

\* les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au risque d'erreur  $\alpha$  5% selon le test Newman-Keuls

Tableau 3.14: Résultats des concentrations bactériennes (cfu/ g de sol ou cfu/ml) dans la rhizosphère et à proximité des racines pour les deux variétés de tomate

Echantillons		Souches	CHAO (S1)	C7R12 (S2)	P64 (S3)	S20 (S4)	CK4 (S5)
A partir de la rhizosphère (cfu/g de sol)	Variété NEDJMA		1,68.10 <sup>22</sup> <b>22,22*</b>	1,71.10 <sup>23</sup> <b>23,23</b>	1,58.10 <sup>23</sup> <b>23,19</b>	2,28.10 <sup>23</sup> <b>23,35</b>	2,15.10 <sup>23</sup> <b>23,32</b>
	Variété AGORA		3,4. 10 <sup>14</sup> <b>14,53</b>	2,76.10 <sup>18</sup> <b>18,44</b>	5,31.10 <sup>17</sup> <b>17,72</b>	7,18.10 <sup>20</sup> <b>20,85</b>	3,6. 10 <sup>18</sup> <b>18,55</b>
A partir des Racines (cfu/ml)	Variété NEDJMA		4,64.10 <sup>19</sup> <b>19,66</b>	7,8.10 <sup>18</sup> <b>18,89</b>	2,58.10 <sup>19</sup> <b>19,41</b>	4,7.10 <sup>18</sup> <b>18,67</b>	2,59.10 <sup>19</sup> <b>19,41</b>
	Variété AGORA		1,03.10 <sup>19</sup> <b>19,01</b>	8,6.10 <sup>18</sup> <b>18,93</b>	9,7.10 <sup>18</sup> <b>18,98</b>	4,8.10 <sup>18</sup> <b>18,68</b>	6,9.10 <sup>18</sup> <b>18,83</b>

\* = log [concentrations bactériennes], exemple log [1,68 x 10<sup>22</sup>] = 22,22.  
La concentration bactérienne initiale : 10<sup>9</sup> cfu/ ml (6)

Parallèlement à la détermination de la dynamique des populations, une étude de la colonisation racinaire a été réalisée montrant des résultats très satisfaisants pour les cinq souches. Les portions de racines (ou les racines entières) déposées sur le milieu de culture (King B) ont présenté un développement rapide (moins de 24 heures de culture) et régulier de colonies blanchâtres caractéristiques de *Pseudomonas fluorescens* très apparentes au tour des racines. Ces colonies fusionnent après 24 heures de cultures pour former une couche délimitant parfaitement les racines.

### 3.3 Gains des paramètres étudiés

L'évaluation des effets de la bactérisation sur la phytostimulation des plants (de tomate et de pomme de terre) s'est basée sur l'estimation des gains (%) obtenus comparativement aux plants non bactérisés (témoins) (Appendices L, M, N).

#### 3.3.1 Taux de levée

Les gains obtenus montrent une meilleure stimulation chez l'une des deux variétés. En effet les gains sont plus notables chez la variété Agora, et sont enregistrés durant toute la période du suivi marquant un maximum de 86.12 %. La variété Nedjma quant à elle a montré de faibles gains (0.08 % à 3.45 %) (Appendice L).

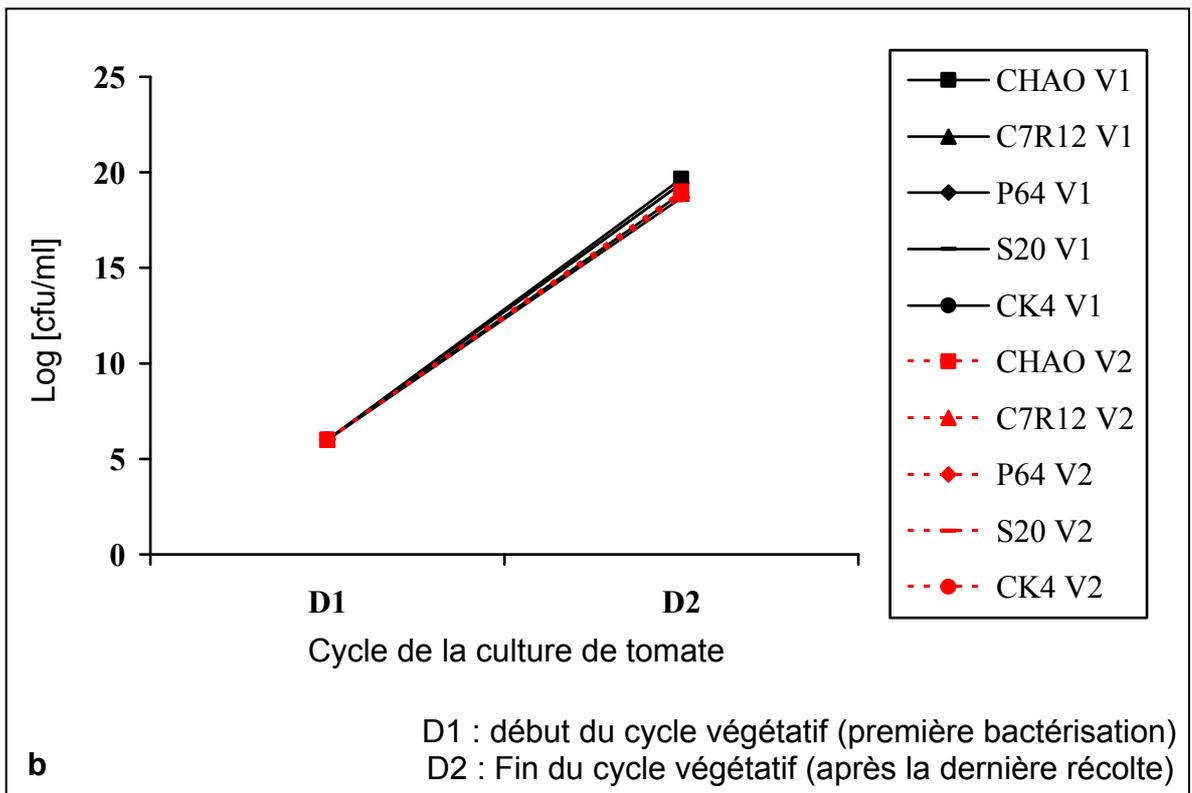
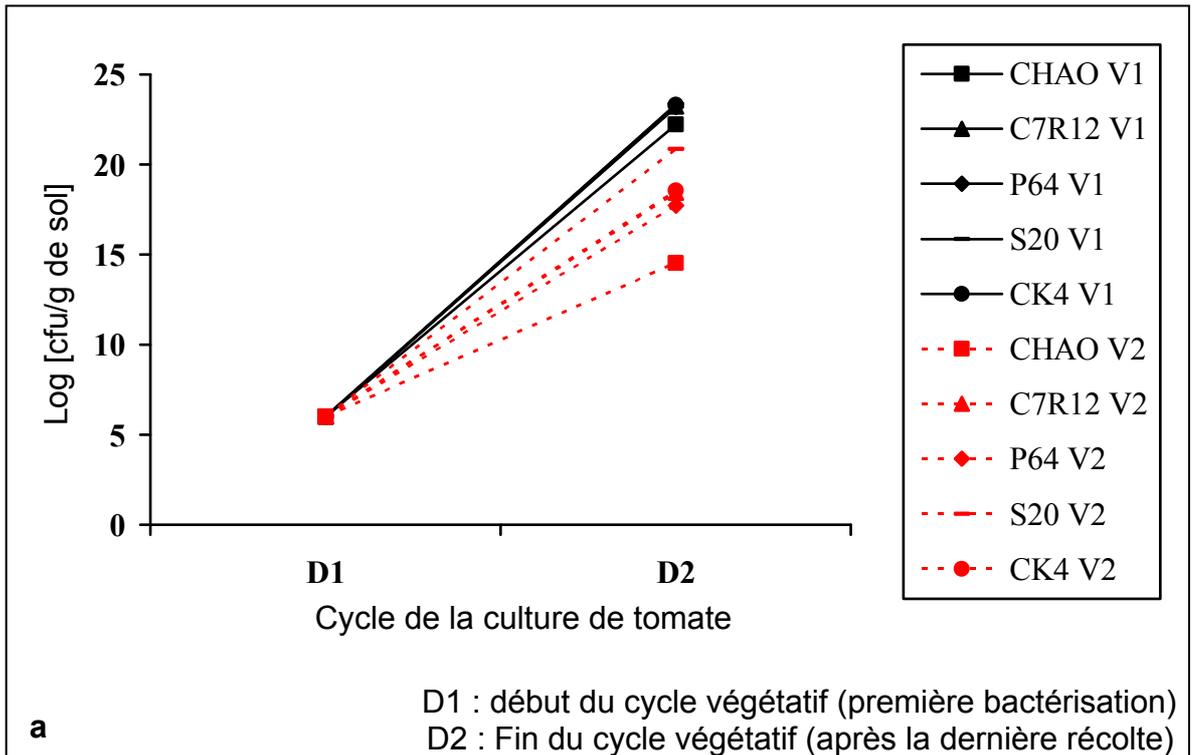


Figure 3.17 : Dynamique des populations bactériennes des cinq souches pour la variété Nedjma (V1) et Agora (V2) :  
 a. A partir de la rhizosphère  
 b. A partir des racines

### 3.3.2 Paramètres de croissance

#### 3.3.2.1 Période avant transplantation

Des gains en paramètres de croissance sont notés en pépinière, 40 jours après le semis, représentés principalement en hauteur des plants, en longueur des racines, en poids frais de la partie aérienne et en poids frais et sec de la partie souterraine.

En hauteur des plants, l'effet de la bactérisation n'était apparent que chez les souches de référence CHAO et C7R12 où les gains variaient de 02.93 % à 09.97 % (Figure 3.18).

Pour la longueur des racines, les gains induits par les cinq souches bactériennes sont importants et ne montrent pas une grande variabilité (de 33.44 % à 47.84 %), le maximum ayant été induit par la souche S20 (Figure 3.18).

L'interaction des deux facteurs (bactérisation et variétés) a montré que l'effet des souches était différent d'une variété à une autre. Pour la variété Nedjma les gains variaient de 37.93 % à 60.34 %, avec un maximum induit par la souche CK4, alors que le minimum a été induit par la souche S20. Pour la variété Agora c'est la souche S20 qui a été la plus performante (57.24 %) et la souche CK4, au contraire, a montré la plus faible valeur (17.24 %) (Figure 3.19).

La bactérisation n'a engendré des gains notables en poids frais de la partie aérienne que chez les souches C7R12 et S20 (09.09 %) (Figure 3.20). Les gains notés chez la variété Nedjma sont nettement supérieurs par rapport à ceux de la variété Agora. Chez la première variété, toutes les souches ont induit des gains, allant de 02.23 % à 20.89 %. Pour la deuxième variété (Agora), seulement deux souches (CHAO et S20) ont provoqué un gain de 04.61 % (Figure 3.21).

Pour le poids frais de la partie racinaire, toutes les souches inoculées ont produit des gains variant de 06.97 % à 27.90 %. Les souche CHAO et C7R12 sont les plus performantes (Figure 3.20).

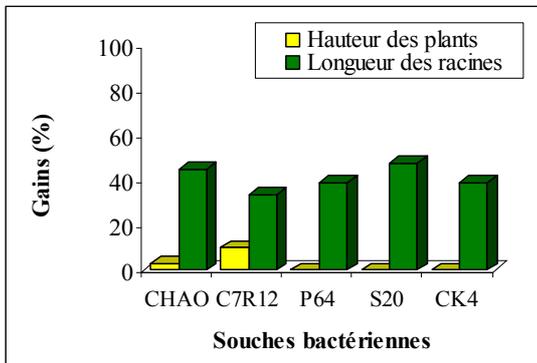


Figure 3.18 : Gains (%) en hauteur des plants et en longueur des racines de tomate au stade pépinière; effet simple de la bactérisation

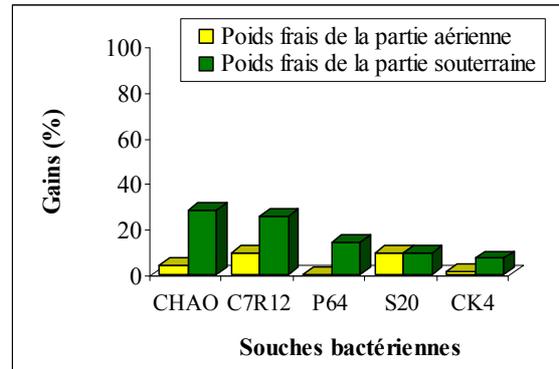


Figure 3.20 : Gains (%) en poids frais de la partie aérienne et souterraine des plants de tomate (stade pépinière); effet simple de la bactérisation

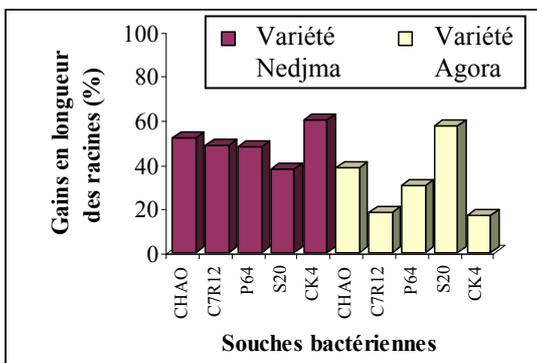


Figure 3.19 : Gains (%) en longueur des racines de tomate au stade pépinière; effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)

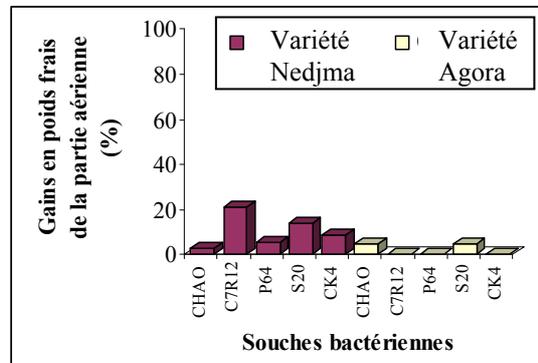


Figure 3.21 : Gains (%) en poids frais de la partie aérienne des plants de tomate (stade pépinière); effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)

Les gains en poids sec de la partie souterraine (racines) sont plus importants que ceux notés pour le poids frais, variant de 20 % à 60 %. L'effet des souches bactériennes est resté constant, car ce sont les souches CHAO et C7R12 qui ont induit les gains les plus élevés (60 % et 40 %) (Figure 3.22).

### 3.3.2.2 Période après transplantation

Durant cette période des effets de phytostimulation sont notables seulement lors des premières dates de suivi après 30 jours de la transplantation. Cette phytostimulation a été exprimée à travers la hauteur des plantules et le nombre de feuilles.

Les gains en hauteur des plants sont significativement différents selon les deux variétés. L'interaction des souches bactériennes avec la variété Nedjma a été positive, elle a révélé des gains variant de 03.11 % à 12.03 %, avec une supériorité chez la souches CK4, ce n'est pas le cas pour la variété Agora où aucun gain n'a été noté (Figure 3.23).

Pour le nombre de feuilles, la bactérisation a induit des gains faibles atteignant un maximum de 10.38 % enregistré chez la souche P64 (Figure 3.24). Les valeurs des gains sont nettement supérieures chez la variété Nedjma (Figure 3.25) ; les souches CK4, P64, C7R12 et S20 ont induits des effets positifs sur ce paramètre variant de 13.59 % à 20.44 %. Chez la variété Agora, un maximum de 04.80 % a été enregistré uniquement avec la souche P64.

### 3.3.3 Paramètre de production

L'application des souches bactériennes n'a montré d'effet notable sur le poids moyen du fruit que lors de la cinquième récolte, les gains enregistrés sont variables de 15.51 % à 35.49 %. Les plants traités avec la souche C7R12 ont montré les meilleurs résultats (Figure 3.26).

L'étude de l'interaction des souches bactériennes avec les deux variétés nous a révélée une meilleure stimulation chez la variété Nedjma, qui a montré des valeurs allant jusqu'à 62.20 %, comparée au maximum (10.70 %) noté chez la

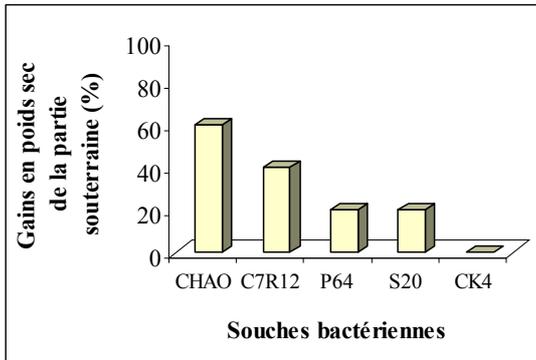


Figure 3.22 : Gains (%) en poids sec de la partie souterraine des plants de tomate (stade pépinière); effet simple de la bactérisation

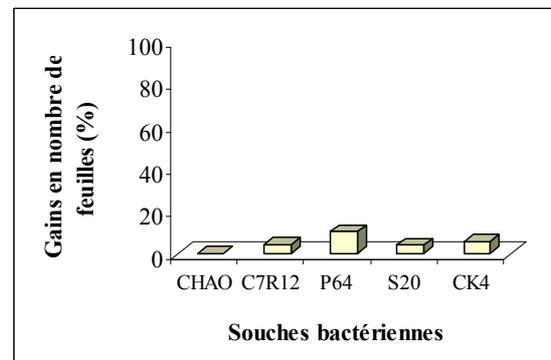


Figure 3.24 : Gains (%) en nombre de feuilles des plants de tomate après transplantation; effet simple de la bactérisation

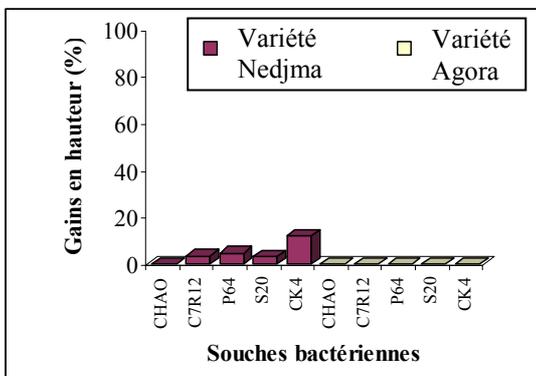


Figure 3.23 : Gains (%) en hauteur des plants de tomate après transplantation; effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)

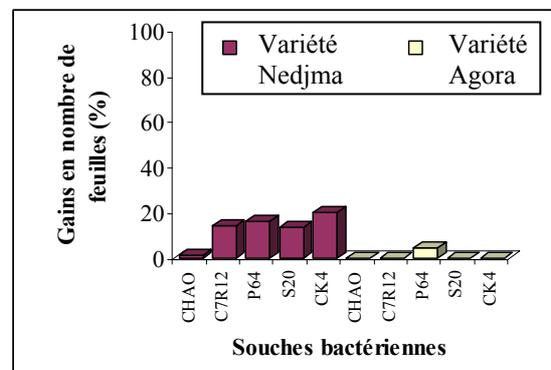


Figure 3.25 : Gains (%) en nombre de feuilles des plants de tomate après transplantation; effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)

variété Agora. L'effet des souches bactériennes est également différent entre les deux variétés, ainsi la souche C7R12 a été la plus performante chez V1 (Nedjma) et celle qui a eu l'effet le moins prononcé chez V2 (Agora) (Figure 3.27).

L'effet des souches bactériennes a été beaucoup plus prononcé sur le poids total des fruits par plant. Les gains sont notés lors des trois dates de récolte : première récolte (08 jours après l'entrée en production), cinquième récolte (40 jours après l'entrée en production) et la sixième récolte (43 jours après l'entrée en production).

Concernant la première récolte, chez la variété Nedjma la souche P64 a été la seule à procurer un gain atteignant 148.86 %. Chez la variété Agora les gains étaient plus faibles variant de 05.30 % à 57.35 % où la souche S20 a montré l'effet le plus prononcé (Figure 3.28).

Pour la cinquième et la sixième récolte, l'étude des gains montre une certaine stabilité dans l'expression des effets positifs des souches bactériennes. La souche C7R12 a induit les meilleurs gains pour les deux dates de récolte, respectivement de 42.66 % et de 48.23 % (Figure 3.29).

#### 3.3.4 Dosages des protéines totales

Pour les gains en protéines totales contenues dans les feuilles (premier dosage), une meilleure interaction des souches bactériennes avec la variété Agora a été notée. En effet chez la variété Nedjma un très faible gain (0.33 %) a été produit par la souche P64 seulement. La variété Agora quant à elle, toutes les souches bactériennes ont montré des gains, cependant peu notables, où le maximum, produit par la souche S20, est de 07.38 % (Figure 3.30).

Pour les gains en protéines totales contenues dans les feuilles (deuxième dosage), La souche P64 a présenté l'effet le plus prononcé (12.15 %) (Figure 3.31).

L'étude des gains produits sur les deux variétés a montré des valeurs plus importantes chez la variété Agora. En effet pour la variété Nedjma les gains variaient entre 02.55 % et 10.58 %, alors que chez la variété Agora le maximum

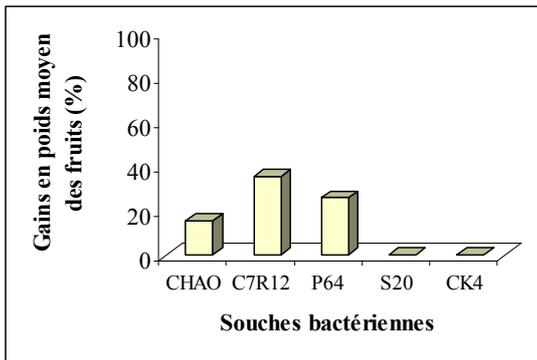


Figure 3.26 : Gains (%) en poids moyen des fruits de tomate (récolte 5); effet simple de la bactérisation

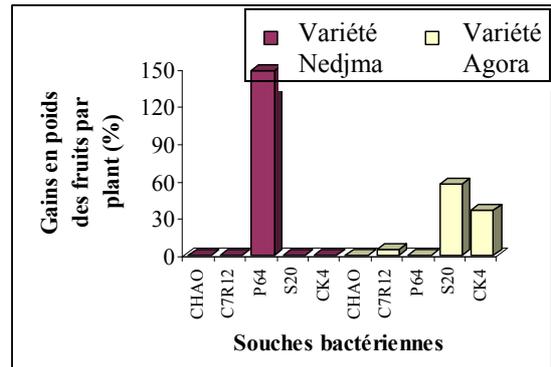


Figure 3.28 : Gains (%) en poids des fruits par plant de tomate (récolte 1); effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)

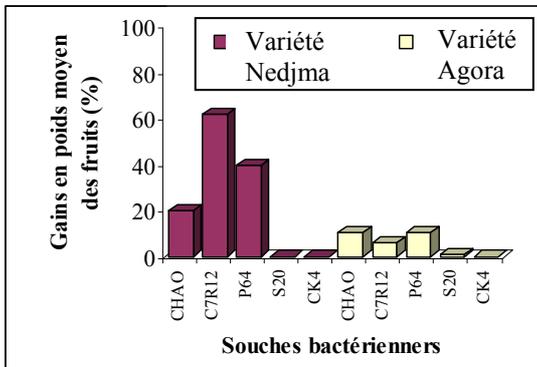


Figure 3.27 : Gains (%) en poids moyen des fruits de tomate (récolte 5); effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)

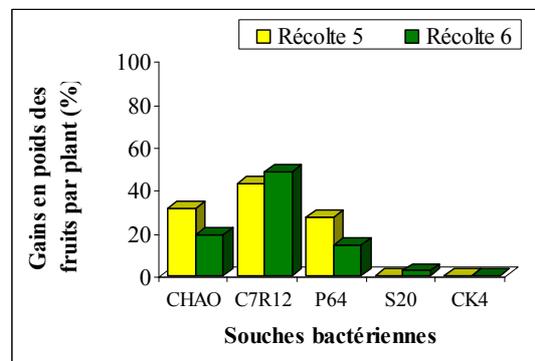


Figure 3.29 : Gains (%) en poids des fruits par plant des récoltes 5 et 6; effet simple de la bactérisation

des gains a atteint 22.78 %. La totalité des souches ont induit des gains chez la variété Agora, avec un effet plus prononcé pour la souche P64 et plus faible avec la souche C7R12. Ce résultat a été inversé chez la variété Nedjma car c'est la souche C7R12 qui a été la plus performante (Figure 3.32).

L'effet de la bactérisation sur le taux de protéines contenues dans les fruits a montré des gains faibles de l'ordre de 05.26 %, ils sont induits principalement par deux souches CHAO et CK4 (Figure 3.31). Pour l'interaction des souches bactériennes avec la variété Nedjma, deux souches CHAO et CK4 ont montré un effet positif sur ce paramètre avec des gains respectivement de 07.50 % et de 15 %. Pour la variété Agora, la souche C7R12 a induit le gain le plus important de l'ordre de 21.62 % (Figure 3.33).

### 3.3.5 Dosage des éléments minéraux

La bactérisation n'a produit d'effet positif sur l'assimilation du phosphore qu'avec la souche P64 en induisant des gains de 11.42 % (Figure 3.34). En étudiant les gains produits par la bactérisation sur les deux variétés, nous avons noté une différence de l'effet des souches. Avec la variété Nedjma, c'est la souche P64 qui a été la plus performante (27.71 %) et pour la variété Agora, c'est la souche C7R12 qui a montré l'effet le plus prononcé (17.80 %) (Figure 3.35).

Les gains en taux de potassium échangeable étaient très faibles (02.53 %) dans le cas de la souche CK4 uniquement (Figure 3.34). L'interaction des souches bactériennes avec les deux variétés a également montré des gains faibles. C'est la souche CK4 qui a produit l'effet positif sur ce paramètre avec des valeurs respectivement de 02.56 % (Nedjma) et 03.79 % (Agora) (Figure 3.36).

Notons enfin que les gains en taux de phosphore assimilable ont montré des valeurs plus importantes que celles produites pour le taux de potassium échangeable, aussi bien pour l'effet simples de la bactérisation que pour leur interaction avec les deux variétés.

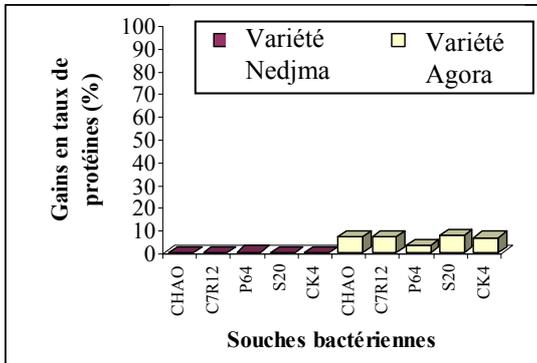


Figure 3.30 : Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les feuilles de tomate (premier dosage); effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)

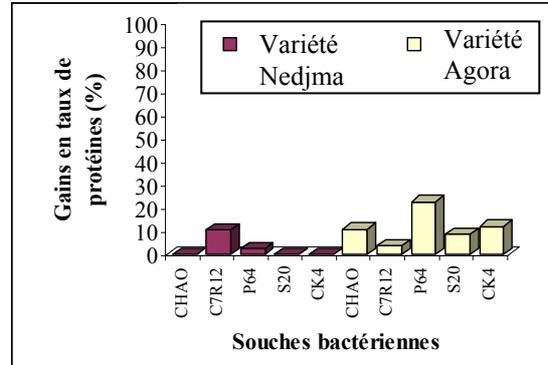


Figure 3.32 : Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les feuilles de tomate (deuxième dosage); effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)

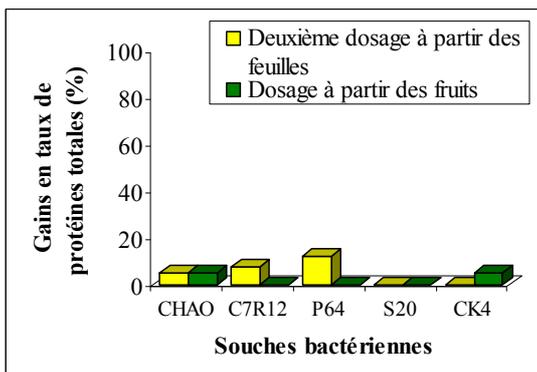


Figure 3.31 : Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les feuilles (deuxième dosage) et dans les fruits de tomate; effet simple de la bactérisation

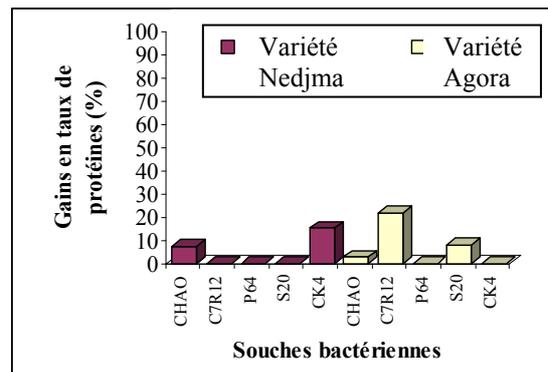


Figure 3.33 : Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les fruits de tomate; effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora)

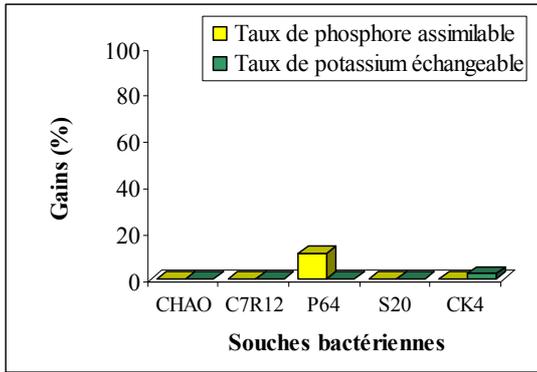


Figure 3.34 : Gains (%) en taux de Phosphore et Potassium; effet simple de la bactérisation (culture de tomate)

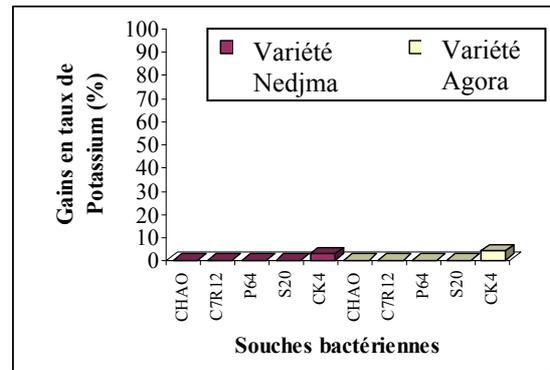


Figure 3.36 : Gains (%) en taux de potassium; effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora) (culture de

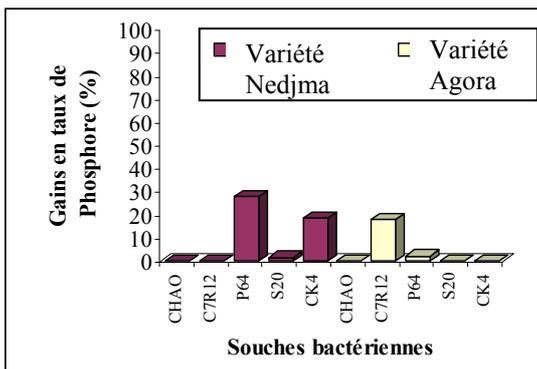


Figure 3.35 : Gains (%) en taux de phosphore; effet interactif des souches bactériennes avec les deux variétés (Nedjma et Agora) (culture de tomate)

## CHAPITRE 4 RESULTATS DE LA CULTURE DE POMME DE TERRE

### 4.1 Phytostimulation de la pomme de terre

#### 4.1.1 Taux de levée

Le suivi du taux de levée des plants de pomme de terre a été réalisé en sept dates. Des levées notables de l'ordre de 4.16 à 11.30 % ont été constatées après 21 jours de la plantation des tubercules. Après quatre jours de cette date soit 25 jours après plantation, pour tous les traitements y compris le témoin, les taux de levée se rapprochent et dépassent largement le seuil de 50 %. A partir de 40 jours jusqu'à la fin des notations (deux après la plantation), nous constatons une stabilisation de l'évolution du taux de levée vers des taux finaux entre 80 à 90 % (Figure 4.1), (Appendice O).

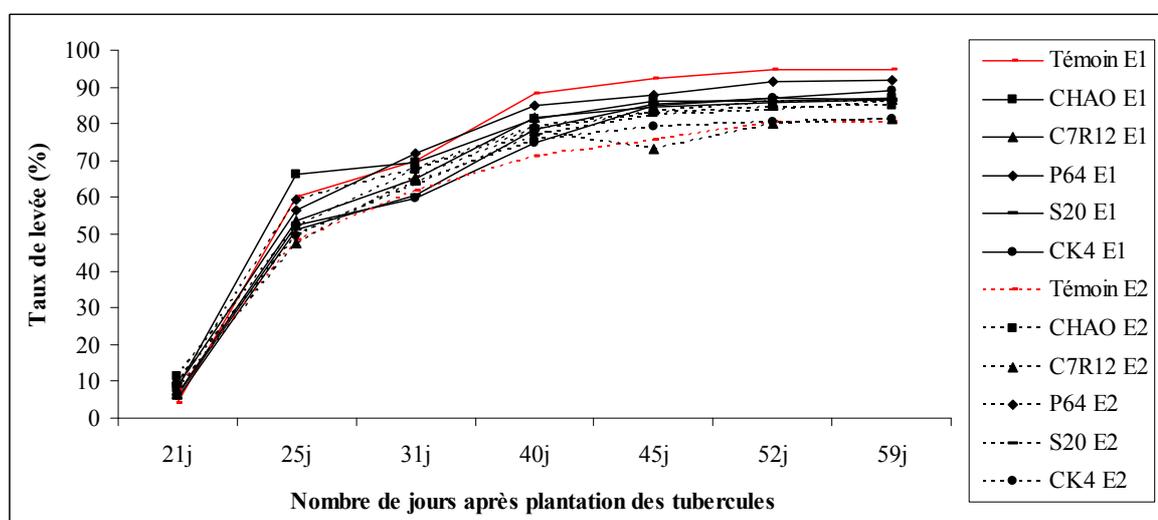


Figure 4.1 : Taux de germination des tubercules de pomme de terre pour l'essai avec fertilisation minérale (E1) et l'essai sans fertilisation (E2)

L'analyse de la variance de ces résultats a montré des effets non significatifs des traitements pour l'interaction des deux facteurs étudiés (bactérisation et fertilisation minérale) ( $P = 0.2026$  à  $0.6566$ ). L'effet de la bactérisation a été surtout significatif ( $P = 0.0067$ ) lors de la première date de notation, 21 jours après la plantation. Comparativement au témoin (5.87 %), les

traitements bactérisés ont été significatifs dans le cas des applications des souches CHAO (9.67 %) et P64 (8.70 %). Le classement des six moyennes recueillies a donné trois groupes homogènes selon le test Newman- Keuls (Figure 4.2).

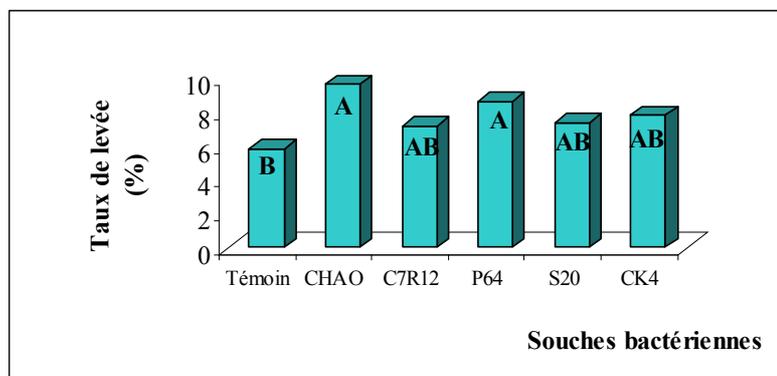


Figure 4.2 : Effet de la bactérisation sur le taux de levée 1<sup>ère</sup> date de suivi (21 jours après la plantation)

#### 4.1.2 Paramètres de croissance

Ces paramètres sont étudiés à la fin du cycle de la culture (Figure 4.3), lors de la récolte des tubercules, soit 120 jours après plantation (Figure 4.4 et 4.5).

##### 4.1.2.1 Biométrie aérienne et souterraine

Les analyses des variances effectuées sur les valeurs notées en hauteur des plants, longueur des racines, nombre des tiges et des feuilles n'ont pas montré des différences significatives entre les traitements (Tableau 4.1), que ce soit pour l'effet de l'interaction des deux facteurs (bactérisation x fertilisation minérale) ( $P = 0.4875 - 0.8787$ ) ou pour l'effet simple des souches bactériennes ( $P = 0.0719 - 0.2084$ ).

Pour le diamètre des tiges, l'analyse de la variance de l'interaction des deux facteurs étudiés a révélé une différence significative ( $P = 0.0145$ ). Le test Newman- Keuls a regroupé les douze moyennes en deux groupes homogènes A et B. Dans l'essai conduit avec fertilisation, l'effet de la bactérisation est nettement distingué chez les plants traités avec les souches S20 (0.69 cm), C7R12 (0.68 cm), P64 (0.67 cm) et CHAO (0.62 cm). Dans l'essai sans fertilisation, l'effet n'est pas apparent où les moyennes obtenues ont montré des variations importantes par rapport au témoin (Tableau 4.1).

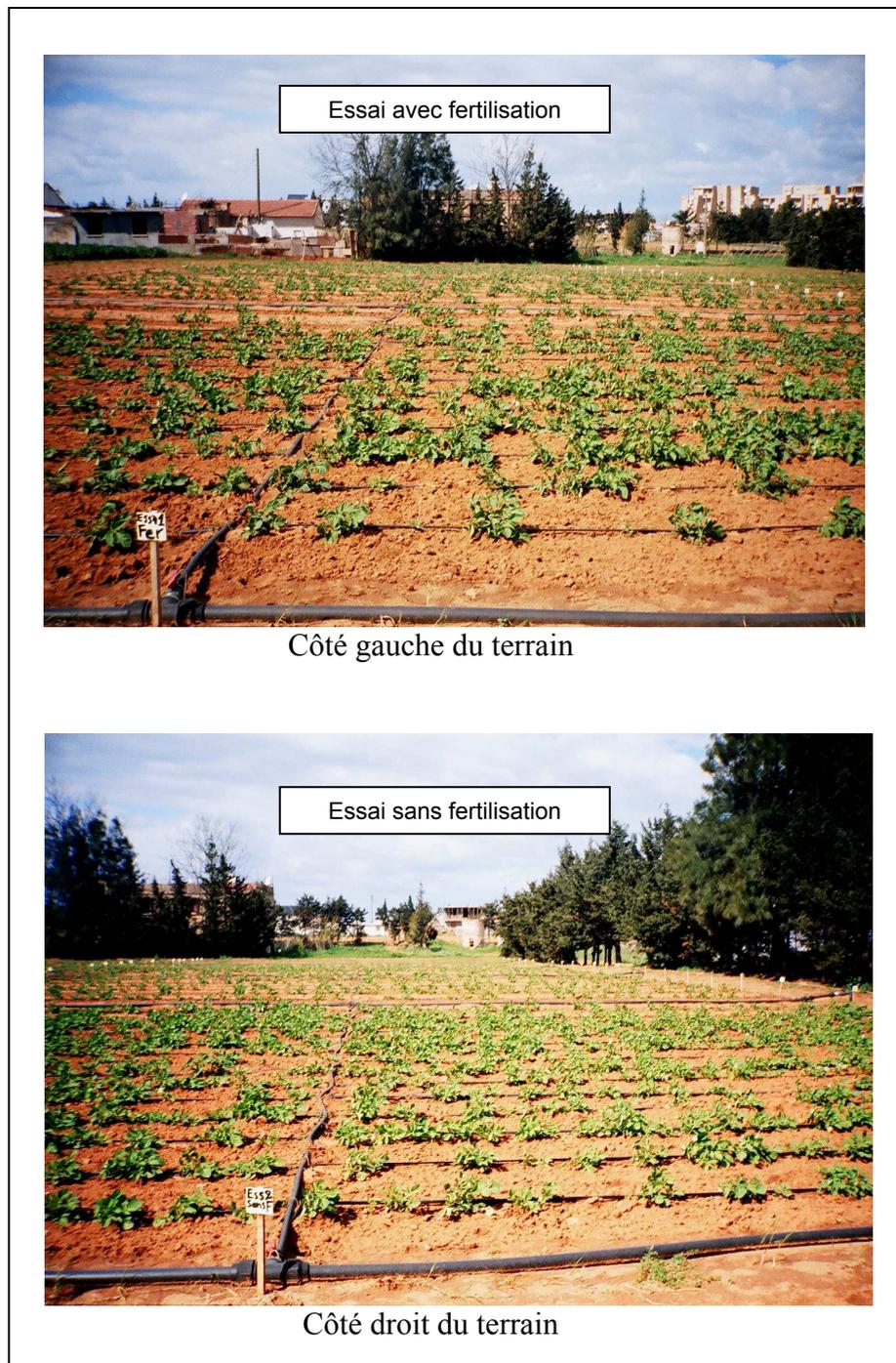


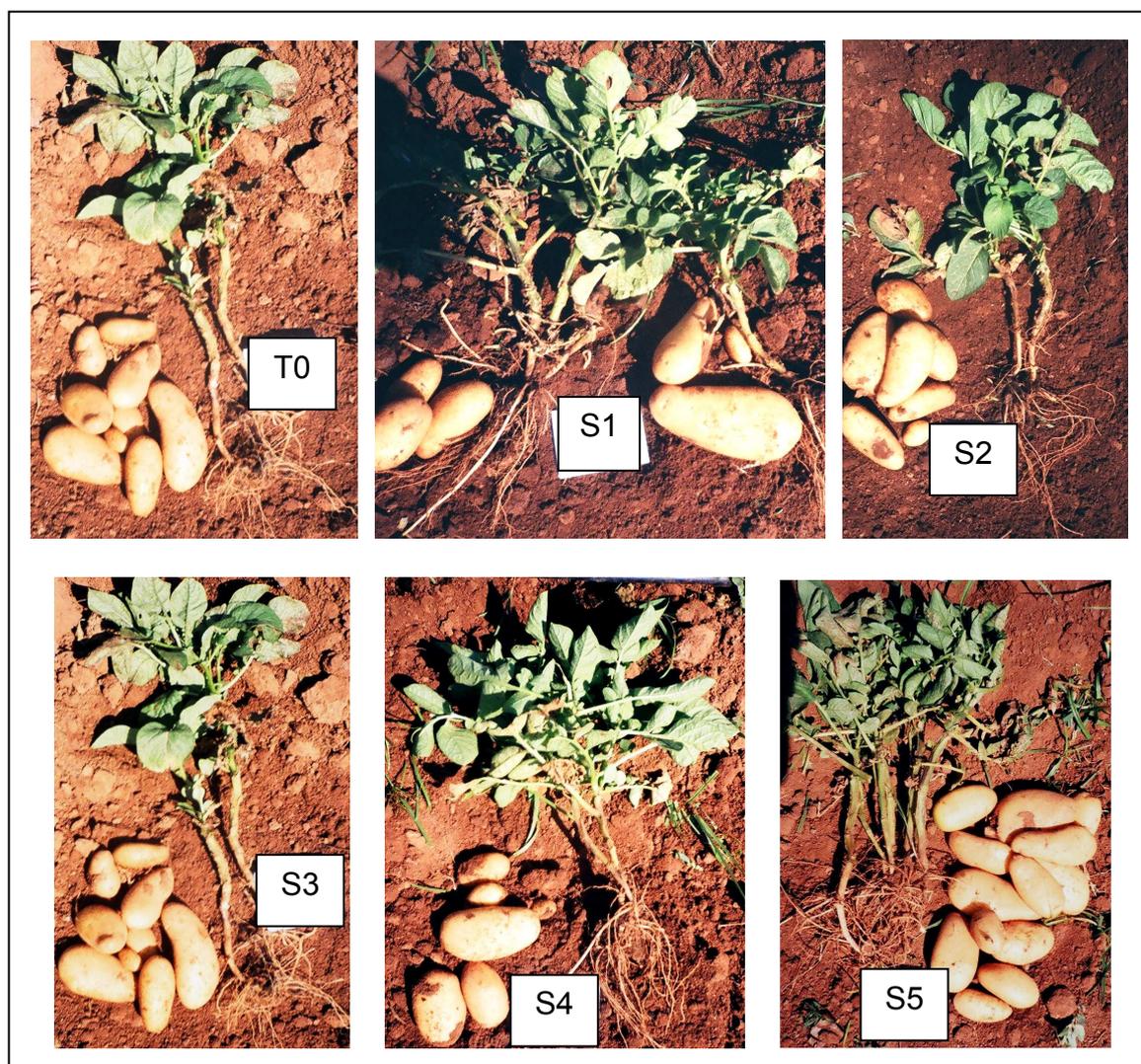
Figure 4.3 : Présentation des deux essais de la culture de pomme de terre après levée de la totalité des tubercules



Echelle  
8 cm

Figure 4.4 : Présentation du plant complet ; partie aérienne, partie souterraine et tubercule de chaque traitement (Essai 1 conduit avec fertilisation minérale)

T<sub>0</sub>: Témoin  
S<sub>1</sub>: CHAO  
S<sub>2</sub>: C7R12  
S<sub>3</sub>: P64  
S<sub>4</sub>: S20  
S<sub>5</sub>: CK4



Echelle  
8 cm

Figure 4.5 : Présentation du plant complet ; partie aérienne, partie souterraine et tubercule de chaque traitement (Essai 2 conduit sans fertilisation minérale)

T<sub>0</sub>: Témoin  
 S<sub>1</sub>: CHAO  
 S<sub>2</sub>: C7R12  
 S<sub>3</sub>: P64  
 S<sub>4</sub>: S20  
 S<sub>5</sub>: CK4

Tableau 4.1 : Effet de l'interaction (souches bactériennes x fertilisation minérale) sur les paramètres de croissance

Traitements	Essai avec fertilisation (E1)						Essai sans fertilisation (E2)					
	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
Hauteur des plants (cm)	15,68	14,94	18,73	16,15	15,81	16,08	15,63	13,35	15,70	13,23	14,61	11,99
	± 1,92	± 1,56	± 3,45	± 0,44	± 1,99	± 0,70	± 3,44	± 0,56	± 4,50	± 2,65	± 1,86	± 1,81
Longueur des racines (cm)	24,28	26,49	27,69	27,94	28,40	26,95	26,12	28,58	26,55	26,81	28,76	26,83
	± 2,46	± 0,69	± 2,89	± 1,58	± 1,42	± 0,64	± 1,80	± 2,30	± 2,30	± 1,90	± 2,82	± 1,58
Nombre des tiges	2,00	2,66	1,89	2,37	2,28	2,25	1,88	2,41	2,08	2,04	2,11	2,26
	± 0,21	± 0,50	± 0,46	± 0,52	± 0,11	± 0,22	± 0,51	± 0,56	± 0,18	± 0,57	± 0,61	± 0,23
Diamètre des tiges (cm)	<b>0,59 ± 0,05</b>	<b>0,62 ± 0,09</b>	<b>0,68 ± 0,05</b>	<b>0,67 ± 0,04</b>	<b>0,69 ± 0,06</b>	<b>0,60 ± 0,03</b>	<b>0,66 ± 0,05</b>	<b>0,62 ± 0,05</b>	<b>0,60 ± 0,04</b>	<b>0,59 ± 0,04</b>	<b>0,58 ± 0,03</b>	<b>0,61 ± 0,04</b>
	<b>B*</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>B</b>
Nombre des feuilles	14,87	16,60	17,44	16,00	15,61	15,61	14,60	13,37	15,45	13,48	14,06	12,30
	± 1,08	± 3,37	± 2,59	± 1,13	± 0,65	± 0,35	± 2,38	± 1,11	± 2,24	± 1,29	± 1,60	± 1,13

\* les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différents au risque d'erreur  $\alpha$  5% selon le test Newman-Keuls

#### 4.1.2.2 Biomasse aérienne et racinaire

L'analyse de la variance réalisée sur la biomasse aérienne n'a révélé de différence significative que pour le poids frais, pour l'effet de la bactérisation ( $P = 0.0179$ ) et de leur interaction avec la fertilisation minérale ( $P = 0.0232$ ). Selon le test Newman-Keuls, qui a fait ressortir six groupes homogènes, les plants traités avec les souches C7R12 (58.85 g) et S20 (47.43 g) et conduits avec fertilisation minérale, ont montré les meilleurs poids frais. Pour l'essai sans fertilisation c'est toujours les plants traités avec la souche S20 (37.31 g) qui se distinguent significativement du témoin (30.79 g) et des plants traités avec les autres souches (Tableau 4.2).

Pour l'effet simple de la bactérisation, trois groupes homogènes sont dégagés par le test Newman-Keuls. Les souches C7R12, S20, P64, et CHAO ont eu un effet significatif sur ce paramètre, les moyennes obtenues ont montré une supériorité par rapport au témoin (Figure 4.6).

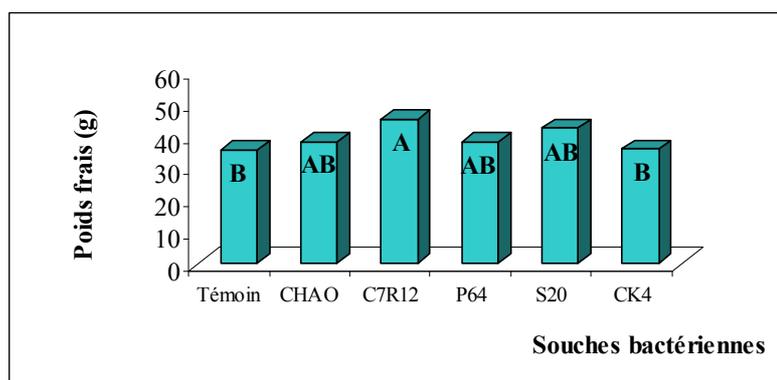


Figure 4.6 : Effet de la bactérisation sur le poids frais de la partie aérienne

En ce qui concerne les poids frais et secs des racines, l'analyse de la variance n'a révélé aucune différence notable aussi bien pour l'effet de la bactérisation ( $P = 0.2702$  et  $0.6511$ ) que de l'interaction des deux facteurs étudiés sur ce paramètre ( $P = 0.3066$  et  $0.3697$ ) (Tableau 4.2).

#### 4.1.3 Paramètres de production

L'évaluation de la production a été réalisée à travers le nombre de tubercules par plant, le poids frais et le poids sec moyens d'un tubercule (Figures 4.4 et 4.5).

Tableau 4.2 : Effet de l'interaction (souches bactériennes x fertilisation minérale) sur la biomasse aérienne et racinaire (g)

Traitements		Essai avec fertilisation (E1)						Essai sans fertilisation (E2)					
		Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
Partie aérienne (g)	<b>Poids frais</b>	40,74 ± 2,77 BC*	42,23 ± 4,98 BC	58,85 ± 8,58 A	43,56 ± 7,97 BC	47,4 3 ± 8,71 B	44,3 0 ± 4,15 BC	30,79 ± 6,38 CD	33,83 ± 4,16 CD	31,34 ± 2,56 CD	32,8 9 ± 4,15 CD	37,3 1 ± 2,00 BCD	27,3 5 ± 6,03 D
	<b>Poids sec</b>	6,58 ± 1,17	5,71 ± 1,06	7,87 ± 2,59	5,84 ± 0,60	7,34 ± 1,01	6,82 ± 1,39	4,03 ± 0,64	4,09 ± 0,60	4,05 ± 0,39	4,55 ± 0,95	4,54 ± 0,73	3,77 ± 1,06
	<b>partie racinaire (g)</b>	6,17 ± 2,00	8,28 ± 1,29	7,22 ± 1,28	9,57 ± 1,33	7,95 ± 2,12	8,47 ± 0,51	7,55 ± 1,28	8,37 ± 2,01	7,39 ± 2,48	7,60 ± 1,25	8,17 ± 0,60	6,88 ± 0,45
	<b>Poids sec</b>	1,37 ± 0,45	1,44 ± 0,33	1,65 ± 0,76	2,04 ± 0,69	1,46 ± 0,34	1,52 ± 0,26	1,25 ± 0,23	1,48 ± 0,20	1,18 ± 0,45	1,27 ± 0,25	1,53 ± 0,30	1,14 ± 0,30

\* les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différents au risque d'erreur  $\alpha$  5% selon le test Newman-Keuls

L'analyse de la variance effectuée sur ces paramètres a révélé une différence non significative entre les plants traités et les plants témoins. Les probabilités obtenues étaient largement supérieures à 0.05 pour l'interaction des facteurs étudiés ( $P = 0.3064 - 0.7076$ ) et pour l'effet de la bactérisation ( $P = 0.0774 - 0.5226$ ). En examinant ces paramètres, certains plants bactérisés ont présenté des valeurs élevées par rapport au témoin, mais ces amplitudes demeurent non significatives, ce qui est dû aux grandes variabilités constatées sur le terrain (Tableau 4.3).

#### 4.1.4 Dosages des protéines totales

Les analyses des variances relatives au dosage des protéines totales, à partir des feuilles et des tubercules, ont mis en évidence des différences hautement significatives.

##### 4.1.4.1 Protéines totales contenues dans les feuilles

Pour l'essai conduit avec fertilisation minérale, les feuilles bactérisés avec les souches CHAO, C7R12, S20 et P64 ont présenté des valeurs respectivement de 3.43 mg/ml, 3.17 mg/ml, 3.11 mg/ml et 3.01 mg/ml, qui sont nettement supérieures de celles du témoin (2.95 mg/ml). Pour l'essai sans fertilisation, les souches CHAO et S20 se distinguent clairement du témoin et des autres souches. Les feuilles traités avec ces souches ont montré leur supériorité, respectivement avec les valeurs 3.05 mg/ml et 2.95 mg/ml, par rapport au témoin (2.92 mg/ml). Le test Newman-Keuls classe ces moyennes en onze groupes homogènes (Tableau 4.4).

Notons que les souches CHAO et S20 ont eu un effet significatif constant sur la quantité de protéines en présence et en absence de fertilisation minérale car ce sont les feuilles traitées avec ces souches qui ont montré les meilleurs résultats chez les deux essais.

Pour l'effet simple des souches bactériennes, six groupes homogènes sont dégagés par le test Newman-Keuls. Ce sont également les souches CHAO et S20 qui semblent stimuler significativement le taux de protéines totales (Figure 4.7).

Tableau 4.3 : Effet de l'interaction (souches bactériennes x fertilisation minérale) sur les paramètres de production

Traitements	Essai avec fertilisation (E1)						Essai sans fertilisation (E2)					
	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
Nombre des tubercules récoltés	6,95	7,99	6,92	8,00	7,88	8,38	4,14	5,46	5,69	5,24	5,10	4,95
	± 1,18	± 1,38	± 1,81	± 1,36	± 0,77	± 1,89	± 0,91	± 1,13	± 0,48	± 0,98	± 0,80	± 1,82
Poids frais moyen des tubercules (g)	63,64	78,04	69,63	72,19	76,76	76,97	69,61	71,54	78,50	78,46	75,19	77,38
	± 10,75	± 14,87	± 10,56	± 11,92	± 11,89	± 12,28	± 8,98	± 14,38	± 10,11	± 15,17	± 9,86	± 7,91
Poids sec moyen des tubercules (g)	10,90	14,92	13,12	12,30	14,69	14,84	13,99	13,07	15,05	15,20	14,13	13,30
	± 2,56	± 5,48	± 5,22	± 2,75	± 4,56	± 4,30	± 3,41	± 3,29	± 4,17	± 3,86	± 4,48	± 2,50

Tableau 4.4 : Effet de l'interaction (souches bactériennes x fertilisation minérale) sur le taux des protéines totales (mg/ml)

Traitements	Essai avec fertilisation (E1)						Essai sans fertilisation (E2)					
	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
Tubercule (mg/ml)	0,10 ±	0,08 ±	0,09 ±	0,05 ±	0,11 ±	0,07 ±	0,06 ±	0,09 ±	0,07 ±	0,06 ±	0,07 ±	0,07 ±
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
	AB*	CD	BC	E	A	CDE	DE	BC	CDE	E	CDE	CDE
Feuilles (mg/ml)	2,95 ±	3,42 ±	3,17 ±	3,01 ±	3,11 ±	2,85 ±	2,92 ±	3,05 ±	2,65 ±	2,73 ±	2,95 ±	2,79 ±
	0,01	0,01	0,12	0,01	0,04	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01
	EF	A	B	DE	BC	G	F	CD	I	H	EF	GE

\* les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différents au risque d'erreur  $\alpha$  5% selon le test Newman-Keuls

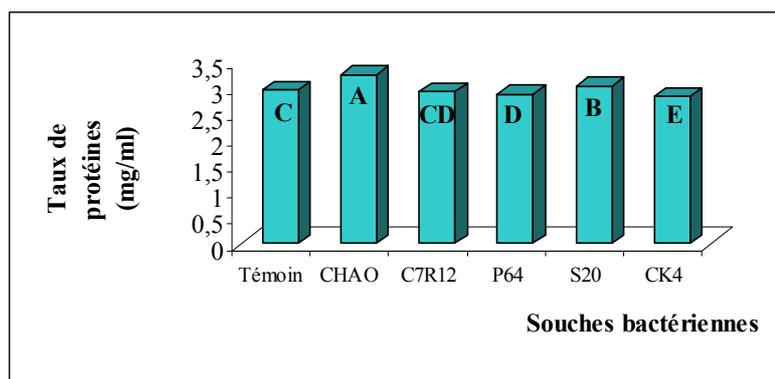


Figure 4.7 : Effet de la bactérisation sur le taux de protéines totales contenues dans les feuilles

#### 4.1.4.2 Protéines totales contenues dans les tubercules

D'après les résultats du test Newman-Keuls sept groupes homogènes sont ainsi dégagés. Pour l'essai conduit avec fertilisation les meilleurs résultats (0.11 mg/ml) sont enregistrés chez les tubercules traités avec la souche S20 (Tableau 4.4). Concernant l'essai sans fertilisation, les plants traités avec les souches CHAO, CK4, C7R12 et S20 ont donné des valeurs allant de 0.09 mg/ml à 0.07 mg/ml et ont ainsi montré leur supériorité par rapport au témoin (0.06 mg/ml).

Enfin pour l'effet simple de la bactérisation, selon le test Newman-Keuls les six moyennes sont réparties en quatre groupes homogènes (Figure 4.8). Les tubercules traités avec la souche S20 ont montré une légère supériorité (0.09 mg/ml) par rapport au témoin (0.08 mg/ml).

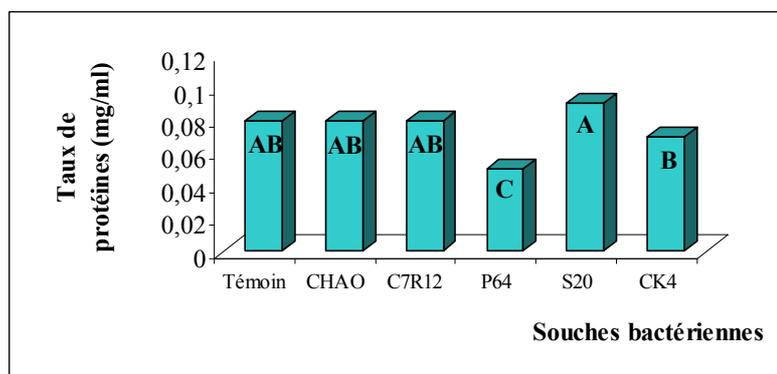


Figure 4.8 : Effet de la bactérisation sur le taux de protéines totales contenues dans les tubercules

## 4.2 Activités rhizosphériques

### 4.2.1 Dosage des éléments minéraux

Les analyses des variances ont montré une différence significative pour le taux du phosphore assimilable ( $P = 0.0031$ ) et des différences hautement significative ( $P = 0.00$ ) lors du dosage du potassium échangeable présent dans la rhizosphère.

#### 4.2.1.1 Dosage du Phosphore

Le test Newman-Keuls a classé les six moyennes en quatre groupes homogènes (Tableau 4.5). D'après ce classement, les plants traités avec les souches C7R12, CHAO, P64 et CK4 se distinguent significativement du témoin (148.33 ppm) avec respectivement, 178.00 ppm (A), 172.67 ppm (AB), 156,67 ppm (BC), 153.67 ppm (BC).

#### 4.2.1.2 Dosage du Potassium

En se référant toujours aux résultats du test Newman-Keuls trois groupes homogènes sont obtenus A, B et C (Tableau 4.5). Des résultats meilleurs que ceux du témoin (0.66 meq/100g de sol) sont notés chez les plants bactérisés avec les souches CK4 et S20 (0.77 meq/100g de sol), ces deux moyennes occupent par conséquent le premier groupe (A).

### 4.2.2 Colonisation racinaire

Pour la culture de pomme de terre, une seule bactérisation a été réalisée avec une concentration bactérienne de  $10^6$  cfu/ml pour les cinq souches. A la fin du cycle de la culture (après 120 jours) les résultats du dénombrement bactérien nous ont révélés des valeurs nettement supérieures à la concentration initiale, expliquant une forte colonisation rhizosphérique et racinaire de ces souches. Ces valeurs oscillaient dans un intervalle de  $10^8$  et  $10^{26}$  cfu/g de sol, selon les souches bactériennes l'échantillon utilisé et la présence ou l'absence de la fertilisation minérale (Tableau 4.6), (Figure 4.9).

Concernant la colonisation racinaire des cinq souches, nous avons obtenu un résultat identique à celui de la culture de tomate. Des colonies individualisées entourent parfaitement les racines (portion de racine) déposées sur le milieu de culture (King B) après moins de 24 heures d'incubation.

Tableau 4.5 : Effet de la bactérisation sur le taux de phosphore (ppm) et potassium (meq/100g de sol)

Traitements	Témoin	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
Dosage du phosphore (ppm)	148,33 ± 14,19 C*	172,67 ± 7,09 AB	178,00 ± 12,49 A	156,67 ± 1,53 BC	141,67 ± 9,29 C	153,67 ± 4,73 BC
Dosage du potassium (meq/100g de sol)	0,66 ± 0,01 B	0,67 ± 0,01 B	0,68 ± 0,01 B	0,61 ± 0,01 C	0,77 ± 0,01 A	0,77 ± 0,01 A

\* les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différents au risque d'erreur  $\alpha$  5% selon le test Newman-Keuls

Tableau 4.6 : Résultats des concentrations bactériennes (cfu/ g de sol ou cfu/ ml) dans la rhizosphère et à proximité des racines pour l'essai avec fertilisation minérale (Essai 1) et sans fertilisation minérale (Essai 2)

Souches		CHAO (S1)	C7R12 (S2)	P64 (S3)	S20 (S4)	CK4 (S5)
A partir de la rhizosphère (cfu/ g de sol)	Essai 1	1,40.10 <sup>10</sup> <b>10,14*</b>	7,04. 10 <sup>8</sup> <b>8,84</b>	1,66. 10 <sup>9</sup> <b>9,22</b>	7,67.10 <sup>8</sup> <b>8,88</b>	4,30. 10 <sup>9</sup> <b>9,63</b>
	Essai 2	4,52.10 <sup>23</sup> <b>23,65</b>	3,35.10 <sup>19</sup> <b>19,52</b>	3,29.10 <sup>19</sup> <b>19,51</b>	2,7. 10 <sup>21</sup> <b>21,43</b>	3,98. 10 <sup>26</sup> <b>26,59</b>
A partir des Racines (cfu/ ml)	Essai 1	4,6. 10 <sup>22</sup> <b>22,66</b>	6,11.10 <sup>17</sup> <b>17,78</b>	3,72.10 <sup>13</sup> <b>13,57</b>	1,18.10 <sup>18</sup> <b>18,07</b>	1,58. 10 <sup>18</sup> <b>18,19</b>
	Essai 2	1,69.10 <sup>23</sup> <b>23,22</b>	1,8. 10 <sup>19</sup> <b>19,25</b>	3,96.10 <sup>11</sup> <b>11,59</b>	4,5. 10 <sup>22</sup> <b>22,65</b>	3,01. 10 <sup>23</sup> <b>23,47</b>

\* = log [concentrations bactériennes], exemple log [1,40 x 10<sup>10</sup>] = 10,14  
La concentration bactérienne initiale : 10<sup>6</sup> cfu/ ml (6).

### 4.3 Gains des paramètres étudiés

#### 4.3.1 Taux de levée

La bactérisation a montré des gains uniquement lors de l'initiation de la levée (21 jours après la plantation des tubercules). Les gains produits par les cinq souches variaient dans un intervalle très rapproché de 7.21 % à 9.67 % avec une légère supériorité chez les plants traités avec la souche CHAO (Figure 4.10), (Appendice P).

#### 4.3.2 Paramètres de croissance

A la fin du cycle de la culture (120 jours), des gains notables ont été enregistrés pour deux paramètres seulement ; le diamètre des tiges et le poids frais de la partie aérienne (Appendice P, Q).

L'application des souches bactériennes en présence de fertilisation minérale (essai 1) semble être une interaction très positive pour le diamètre des tiges. En effet, toutes les souches bactériennes ont induit un effet positif sur ce paramètre, les gains les plus importants variaient entre 13.55 % et 16.94 %. En l'absence de fertilisation minérale (essai 2), les cinq souches n'ont montré aucun gain notable (Figure 4.11).

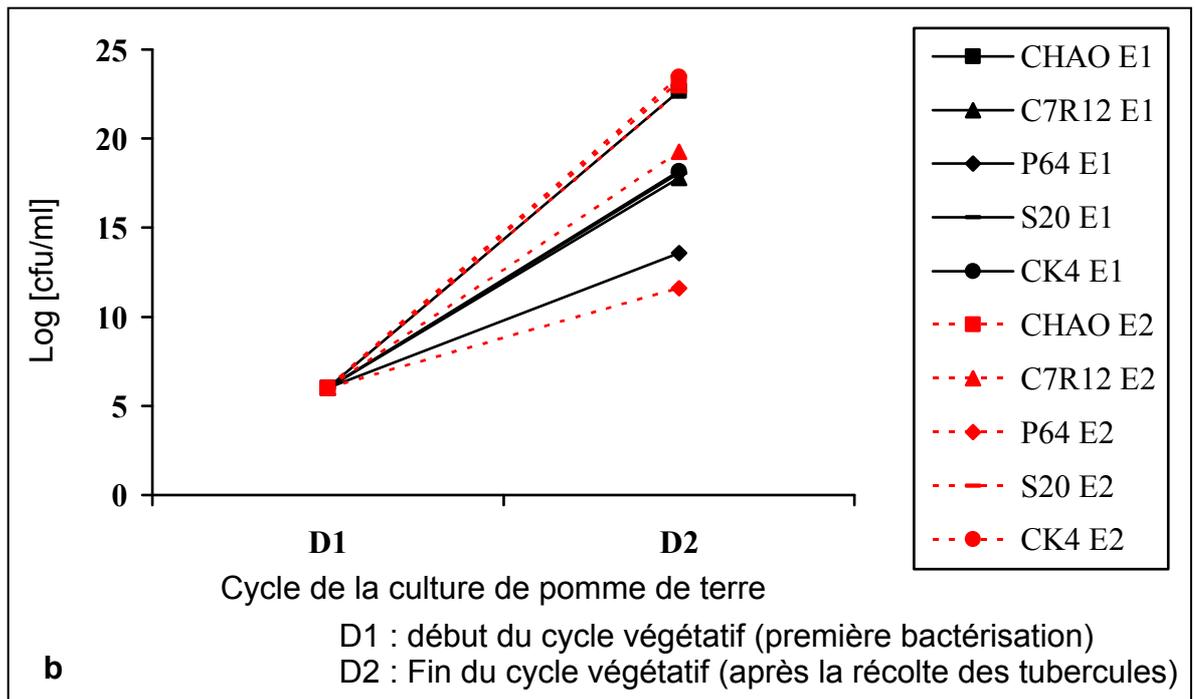
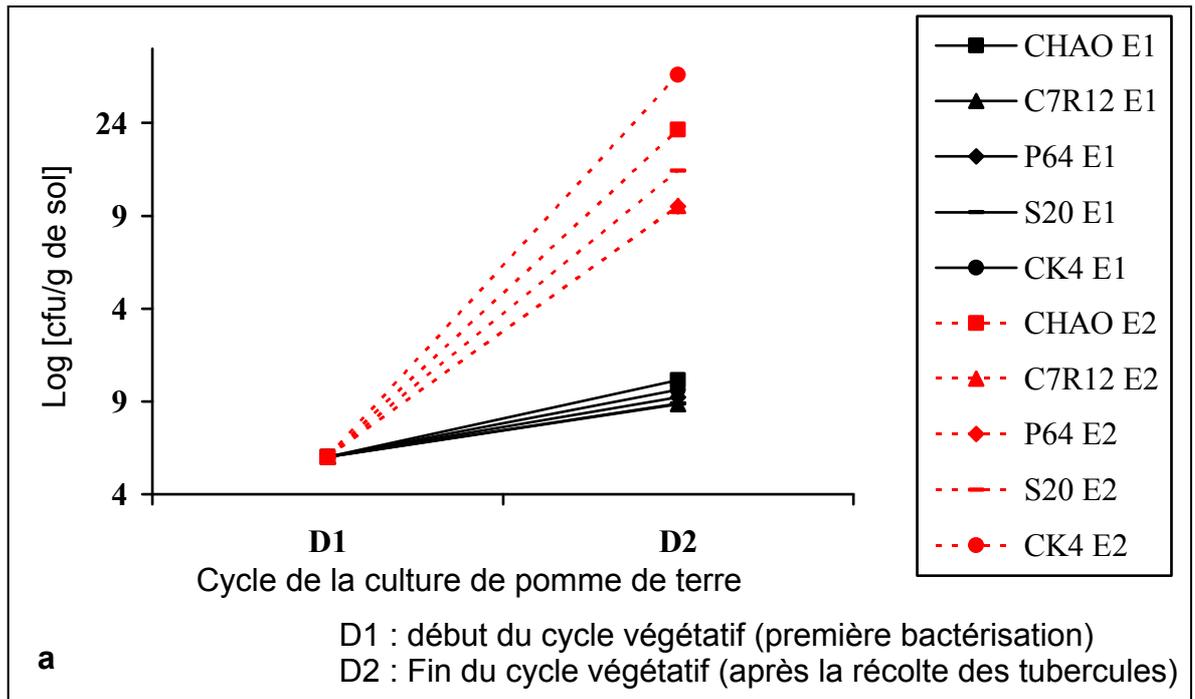


Figure 4.9 : Dynamique des populations bactériennes des cinq souches pour les deux essais (E1 : essai avec fertilisation minérale, E2 : essai sans fertilisation minérale)  
a. A partir de la rhizosphère  
b. A partir des racines

Pour le poids frais de la partie aérienne, des gains ont été enregistrés avec les cinq souches. Une supériorité des souches C7R12 et S20 a été notée, elles ont montré l'effet le plus prononcé (Figure 4.12). L'analyse des gains a révélé une supériorité des valeurs obtenues dans l'essai 1 en comparaison avec celle de l'essai 2. Pour le premier essai, la souche C7R12 a été la plus performante, elle a induit des gains avoisinant 44.45 %. Concernant l'essai 2, un gain maximum de 21.17 % a été induit par la souche S20, alors que la souche C7R12 a eu l'effet le moins prononcé avec un gain de 01.78 % (Figure 4.13).

#### 4.3.3 Dosages des protéines totales

L'effet des souches bactériennes sur le taux de protéines totales (contenues dans les feuilles) a induit des gains allant de 03.06 % à 10.20 % produits respectivement par les souches CHAO et S20 (Figure 4.14), (Appendices P, Q). L'étude de l'interaction des deux facteurs sur ce paramètre a montré une nette supériorité des gains enregistrés dans l'essai 1. En effet, le maximum des gains (15.93 %) a été noté pour l'essai 1 comparativement à l'essai conduit sans fertilisation (04.45 %). Notons que c'est la souche CHAO qui a été la plus performante en induisant les meilleurs gains dans les deux essais (Figure 4.15).

Pour le taux de protéines totales contenues dans les tubercules, la bactérisation n'a montré qu'un gain de 12.50 % induit par la souche S20 (Figure 4.14), (Appendice P, Q). L'effet des souches bactériennes était considérablement différent dans les deux essais, l'application des souches bactériennes en l'absence de la fertilisation minérale semble permettre une interaction positive. En effet dans l'essai 1, seule la souche S20 a induit un gain de 10 %. Pour l'essai 2, les gains étaient plus significatifs atteignant un maximum de 50 % avec la souche CHAO (Figure 4.16).

#### 4.3.4 Dosage des éléments minéraux

Pour le taux de phosphore assimilable, les souches C7R12 et CHAO ont été les plus performantes avec des gains respectivement, de 20 % et de 16.40 %. L'assimilation du potassium échangeable a été plus importante chez les plants traités avec les souches S20 et CK4 ou un maximum de 16.66 % a été noté (Figure 4.17), (Appendice P).

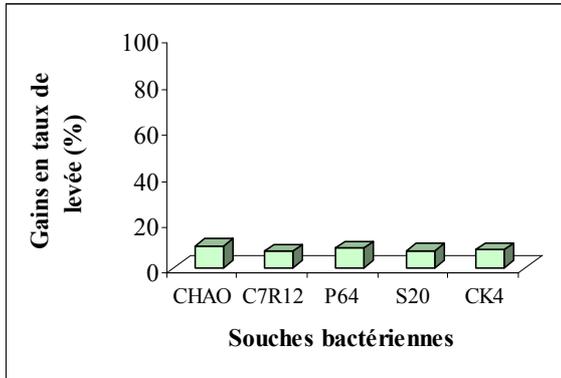


Figure 4.10 : Gains (%) en taux de levée des tubercules de pomme de terre; effet simple de la bactérisation

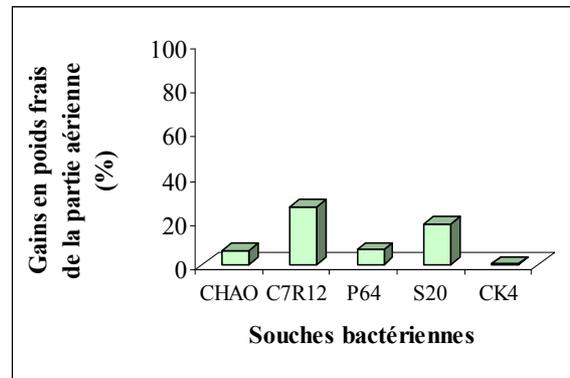


Figure 4.12 : Gains (%) en poids frais de la partie aérienne; effet simple de la bactérisation

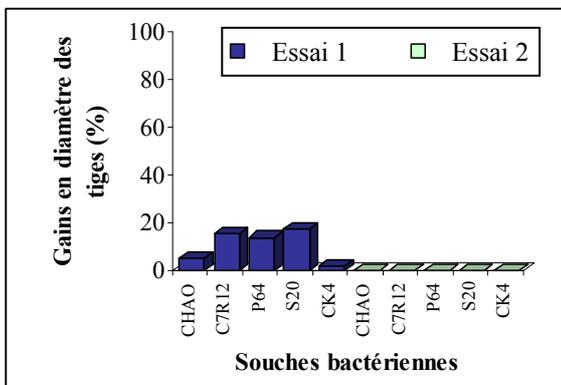


Figure 4.11 : Gains (%) en diamètres des tiges de pomme de terre; effet interactif des souches bactériennes avec les deux essais (avec fertilisation et sans fertilisation minérale)

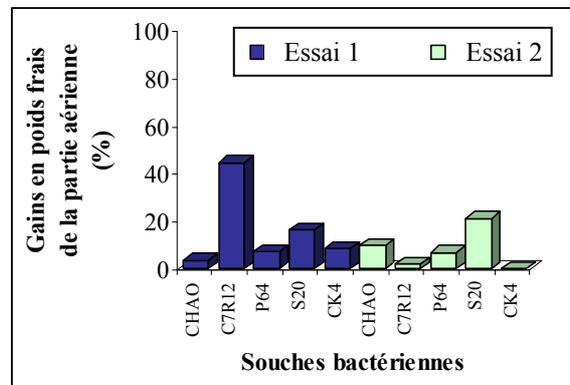


Figure 4.13 : Gains (%) en poids frais de la partie aérienne; effet interactif des souches bactériennes avec les deux essais (avec fertilisation et sans fertilisation minérale)

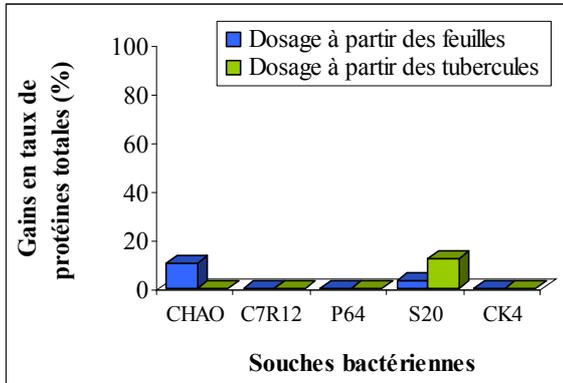


Figure 4.14 : Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les feuilles et dans les tubercules; effet simple de la bactérisation

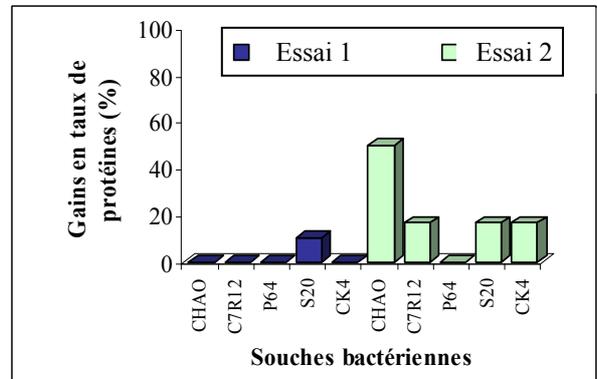


Figure 4.16 : Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les tubercules; effet interactif des souches bactériennes avec les deux essais (avec fertilisation et sans fertilisation minérale)

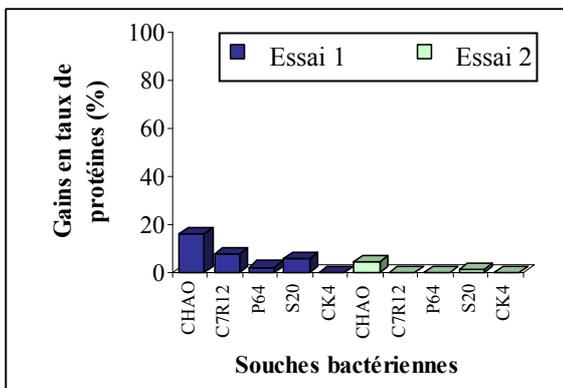


Figure 4.15 : Gains (%) en taux de protéines totales contenues dans les feuilles; effet interactif des souches bactériennes avec les deux essais (avec fertilisation et sans fertilisation minérale)

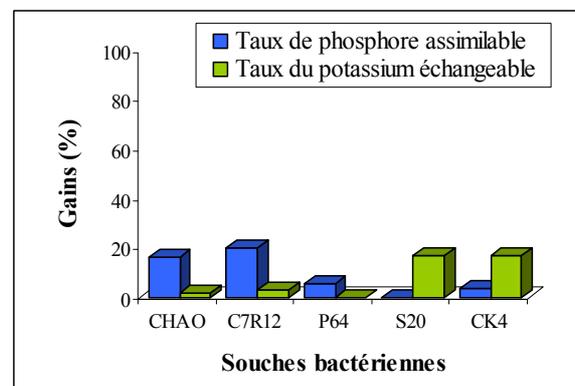


Figure 4.17 : Gains (%) en taux de Phosphore et de potassium; effet simple de la bactérisation (culture de pomme de terre)

## CHAPITRE 5 INTERPRETATION GENERALE

Nos expérimentations ont porté sur l'étude de la biostimulation de la croissance, le développement et la production (rendement) de la culture de tomate (deux variétés ; Nedjma et Agora) et de pomme de terre (deux essais ; essai avec fertilisation et sans fertilisation minérale) par les cinq souches de *Pseudomonas fluorescens* (CHAO, C7R12, P64, S20, CK4) dans des conditions naturelles de production habituellement réunies dans la conduite des cultures maraîchères.

Au terme de notre étude, nous avons enregistré des effets de phytostimulation (des gains) appréciables et variables selon la culture, les paramètres de croissance et de production, qui ont dépassé le seuil de 100 % parfois (Appendices L, M, N, P, Q).

Plusieurs recherches ont été consacrées à l'étude de l'effet de ces souches sur la croissance, le développement et la production de plusieurs espèces végétales notamment la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) et la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). Ces recherches ont pu mettre en évidence des gains très appréciables mais toujours plus importants en conditions contrôlées [173, 57, 174, 175, 22, 33, 1, 34, 168, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 176, 24, 41, 42, 43].

Les gains en taux de levée, même s'ils étaient en terme de quantification assez faibles, il est important de signaler qu'ils sont induits principalement durant les premiers jours suivant la bactérisation. Une accélération de la cinétique de la levée par rapport aux traitements non bactérisés a été notée avec un gain de temps environ de 10 à 23 jours pour la culture de tomate (variété Agora) et de 7 à 14 jours chez la culture de pomme de terre (essai 2 sans fertilisation minérale) (Appendices L, P), (Figure 4.10).

Les études portant sur la promotion de la croissance par des rhizobactéries bénéfiques ont mis l'accent sur leur capacité à promouvoir la germination et la levée. En effet la stimulation de la germination des graines par les bactéries

PGPR, appelées EPR (Emergence Promoting Rhizobacteria) [57], a été mise en évidence par des gains d'émergence signalée par plusieurs auteurs [177, 175, 27, 108, 43]. Des travaux ont été menés en conditions contrôlées sur soja (50 %) [57], sur maïs (30 - 60 %) [177] et sur colza (10 - 40%) [27]

Pour la culture de pomme de terre les gains sont beaucoup plus faibles et moins fréquents, car chez cette espèce la germination et la levée semblent être gouvernés exclusivement par le tubercule mère très riche en réserves nutritives [156].

Notons que les gains en levée présentés par les cinq souches sont aléatoires, entre les deux espèces (tomate et pomme de terre) et les deux variétés de tomate. Ceci se rapproche de ce qu'a rapporté DIGAT [175] que la stimulation de la germination est dépendante des génotypes de l'hôte, ainsi certains génotypes apparaissent très sensibles à l'effet EPR, alors que d'autres semblent être moins sensibles ou les gains sont moins perceptibles [38].

Pour la culture de tomate la plupart des gains en paramètres de croissance (hauteur des plants, longueur des racines, poids frais et sec des partie aérienne et souterraine, nombre de feuilles) ont été notés durant le stade juvénile, qui correspond aux premières dates de notation après la levée complète des plantules (Figures 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25).

Pour la culture de pomme de terre, des gains notables ont été enregistrés pour deux paramètres seulement ; le diamètre des tiges et le poids frais de la partie aérienne (Figures 4.11, 4.12, 4.13).

Plusieurs auteurs [27, 37, 108, 43] ont signalé que l'action directe des PGPR conduit à une production de biomasses aérienne et racinaire accrues. Les bactéries PGPR ont été appliquées à une large gamme d'espèces végétales dans différentes études, afin de mettre en évidence les effets stimulateurs, notamment sur tabac [178], sur pomme de terre sous serre plastique et en plein champ [173, 1, 27, 43], sur laitue [179], sur tomate, blé, haricot dans des conditions contrôlées [38], sur maïs en plein champs [73] et sur chou [1].

En effet les augmentations du poids des racines sont généralement décrites comme des réponses directes aux inoculations avec des PGPR. Plus encore, une prolifération du chevelu racinaire avec une augmentation de la longueur et du nombre des poils absorbants et des racines latérales pouvant avoir un important effet sur la surface occupée par les racines [1, 129, 15]. Un autre aspect de cette amélioration est noté par LEMANCEAU [22] et DAVET [1] celui de l'amélioration de l'assimilation minérale. D'après VESSEY [15] en dépit d'une gamme de 577 éléments nutritifs solubilisés et rendus disponibles aux plantes, les rhizobactéries PGPR en affectant la morphologie des racines, plus particulièrement en augmentant la surface d'absorption des racines, peuvent avoir une influence très importante sur le potentiel du prélèvement de ces éléments nutritifs : l'assimilation du phosphore augmente près de deux fois par rapport aux plantes témoins selon LEMANCEAU [22].

L'action des souches bactériennes sur la levée et les paramètres de croissance semble être beaucoup plus accentuée à des stades précoces vu que cet effet s'atténue avec le développement des plants. L'effet de la phytostimulation est plus perceptible au stade juvénile ce qui est en relation directe avec la physiologie de la plante qui devient beaucoup plus complexe à un stade avancé du cycle de la plante. L'importance relative des rhizobactéries semble dépendre du stade de développement de la plante qui influence la composition des exsudats racinaires. Car les différences enregistrées entre plantes témoin, ne sont significatives que sur jeunes plantes ; elles disparaissent en cours de culture [22].

Des résultats similaires ont été obtenus dans les travaux de DIGAT et al [179] où des gains notables étaient relativement important durant les stades juvéniles des plantules. En 1992, DIGAT [175] a confirmé cette hypothèse en affirmant que les effets bénéfiques des PGPR se font sentir précocement sur la croissance du système racinaire. Selon les travaux de BENCHABANE [38], les effets de la stimulation de la croissance ont été mieux perceptibles au niveau de la longueur cotylédonaire, la masse foliaire et des poids frais de la partie aérienne et des racines donc à des stades jeunes . Ceci peut être expliqué par une meilleure prédisposition de la plante durant les stades juvéniles, surtout au niveau des sites d'action des bactéries (racines).

Pour les paramètres de floraison (le nombre des bouquets floraux, le nombre et le diamètre des fruits noués) aucun gain n'a été enregistré, ce qui semble être régit exclusivement par le génotype de la plante.

DAVET [1] signale qu'à leurs fonctions d'ancrage et d'absorption, les racines ajoutent un rôle d'emmagasiner, les réserves nutritives, accumulées dans les parenchymes racinaires pendant la phase végétative, sont massivement mobilisées au moment de la phase reproductive. Il s'ensuit, chez certaines plantes, des modifications brutales du fonctionnement des racines, qui peuvent fortement perturber l'équilibre qu'elles tentent de maintenir avec les bactéries qui les entourent. Ainsi le manque de gains en cette phase peut être expliqué par cette transition brutale (vers la phase de reproduction) qui s'est traduite par un changement considérable dans la nature des rhizodéposition qui influence directement la communauté bactérienne vivant dans la rhizosphère. Un nouvel équilibre entre bactéries et plantes s'est réinstallé progressivement au début de fructification. De ce fait des gains appréciables ont été enregistrés pour certains paramètres de production ; le poids moyens des fruits et le poids des fruits par plant durant certaines récoltes, cependant aucun gain n'a été noté pour le diamètre des fruits murs (Figures 3.26, 3.27, 3.28, 3.29).

L'augmentation du rendement de plusieurs cultures agricoles suite à des applications de PGPR, dont certaines souches de *Pseudomonas* spp fluorescents, a été vérifiée dans plusieurs études [35, 61, 23, 27, 15, 37, 108, 43] sur pomme de terre en conditions de plein champ (20 - 30 %) [1, 43], sur tomate sous serre [33] et sur blé en plein champ (11 %) [93].

En étudiant les paramètres de production, nous avons noté que des gains plus importants et plus fréquents sont enregistrés pour le paramètre du poids total des fruits par plant (récolte1, 5 et 6) par rapport au poids moyen du fruit (récolte 5). Nous pouvons expliquer ceci par une accumulation des effets des souches bactériennes sur le poids des fruits produit par un plant qui n'est pas perceptible sur le poids moyen d'un seul fruit.

L'effet des souches bactériennes n'est pas constant et varie beaucoup en fonction des conditions environnementales, ceci a été étudié par GAGNE et al [33] qui ont déterminé les rendements de la culture de tomate sous serre pour une production de printemps et d'automne après inoculation des souches de *Pseudomonas fluorescens* dans des substrats commerciaux de tourbe :

- Dans la culture de printemps, des augmentations en rendement de fruits commercialisables étaient produites par les souches bactériennes testées, mais les résultats n'étaient pas statistiquement significatifs. Aucune des bactéries n'a affecté significativement le diamètre (dimension) des fruits.
- Les expériences menées en automnes quand les plantes étaient cultivées sous des conditions environnementales défavorables, les souches de *Pseudomonas fluorescens* ont augmenté significativement le rendement de fruits commercialisables près de 13.3% ( $P \leq 0.1$ ) et le poids de fruit (du premier choix) de 18.2% ( $P \leq 0.05$ ). La taille moyenne des fruits récoltés était également augmenté de 11.1% ( $P \leq 0.05$ ) les plantes bactérisés ont produit 12% des fruits non commercialisables par rapport au 23% pour le témoin.

D'après PAPADOPOULOS [180] et CHAUX et al [181], l'environnement dans lequel croissent les plants de tomate a un effet considérable sur la productivité et la rentabilité de la culture. Trois facteurs essentiels interviennent de façon variable, aux différents stades du développement, température de l'air et du sol, l'intensité et durée d'éclairement et hygrométrie de l'air. Des gains plus importants sont généralement notés à la première phase du cycle où la croissance des plantes est lente, les souches bactériennes ont pu durant cette période avoir un effet significatif sur les différents paramètres examinés. Par contre pour la deuxième phase, les bactéries ont montré des gains moins fréquents ou négligeables vu la rapidité de la croissance et du développement des plantes.

Pour la culture de pomme de terre, les souches bactériennes ne semblent avoir aucun effet sur les paramètres de production (poids et nombre des tubercules récoltés) qui sont contrôlés par des mécanismes plus complexes. Ceci ne concorde pas avec certaines études [173, 1, 43] où des gains appréciables en rendement ont été obtenus. HOWIE et al [173] a montré que l'effet des souches

bactériennes peut varier considérablement selon les cultivars et le type du sol. Aucune combinaison des traitements donnés des souches de *Pseudomonas* spp fluorescents, cultivar de pomme de terre et type de sol n'était réellement meilleure que les autres.

Pour expliquer le manque de gains en paramètres de production, il faut noter que l'effet des souches de PGPR est tributaire d'un certain nombre de facteurs biotiques et abiotiques qui modifie profondément la nature de leur action (positive ou négative).

Il est généralement admis chez la pomme de terre l'existence d'un stimulus capable d'induire la tubérisation. L'antagonisme constaté entre croissance et tubérisation et les hypothèses explicatives de l'induction suggèrent l'intervention de substances stimulatrices et inhibitrices de la croissance. Le stimulus hormonal de tubérisation contient une ou des substances inhibitrices de la croissance. Les effets sont antagonistes à ceux des gibbérellines, il est possible que l'acide abscissique constitue tout ou une partie du stimulus de tubérisation, il est présent dans le tubercule de pomme de terre. Certaines cytokinines (kinétine), la coumarine et les acides phénoliques sont également évoqués comme des promoteurs possibles de tubérisation [182, 156].

Pour la culture de tomate, les plants traités avec certaines souches ont montré des gains appréciables. C'est le cas du taux de protéines totales contenues dans les feuilles et dans les fruits (Figures 3.30, 3.31, 3.32, 3.33). Pour renforcer les résultats des gains obtenus, DIGAT [175] affirme que les espèces de *Pseudomonas* spp fluorescents améliorent la nutrition des plantes par la voie de fixation d'azote. Selon LEMANCEAU [22] plusieurs auteurs ont réussi à isoler de la rhizosphère des *Pseudomonas* spp fluorescents fixateurs d'azote.

Concernant la culture de pomme de terre, des gains notables sont également enregistrés pour les quantités de protéines contenues dans les feuilles et dans les tubercules. (Figures 4.14, 4.15, 4.16). Les résultats de l'expérience menée par OSWALD et al [43] selon laquelle des plants de pomme de terre sont inoculés avec des rhizobactéries PGPR, concordent avec nos résultats car une augmentation de la fixation de l'azote est notée, plus encore une partie importante

de l'azote total absorbé étaient distribuée aux feuilles et aux tubercules. Le taux de protéines totales peut nous renseigner sur le taux d'azote contenu dans un organe végétal. Selon ROUSSELLE et al [156] l'azote est le facteur déterminant du rendement de la culture, il favorise dans un premier temps le développement du feuillage, puis la formation et le grossissement des tubercules. Ainsi les gains obtenus démontrent une stimulation de la croissance et du développement des plantes.

Les résultats relatifs au dosage du phosphore assimilable et du potassium échangeable, présents dans les rhizosphères des plants de tomate ont également révélé des gains (Figures 3.34, 3.35, 3.36).

Comme cité dans plusieurs travaux [22, 126, 73, 20], les souches de *Pseudomonas* spp fluorescents solubilisent le phosphore et le potassium se trouvant sous des formes insolubles pour le rendre disponible aux plantes et facilement assimilables de ce fait les quantités du phosphore et du potassium soluble sont plus importantes à proximité des racines. L'amélioration de l'alimentation minérale de la plante en phosphore a été la première hypothèse proposée pour expliquer l'effet bénéfique enregistré à la suite de la bactérisation de plantes par des *Pseudomonas* spp fluorescents [22].

De nombreuses études ont également prouvé que les PGPR peuvent améliorer la croissance des plantes en solubilisant le potassium se trouvant sous des formes non solubles et le rendre disponibles aux plantes par des acides organiques sécrétés par ces bactéries [126, 20].

Dans notre expérimentation la solubilisation du phosphore semble être un mécanisme très importants chez cette espèce (*Pseudomonas fluorescens*) puisque les gains produits en taux de phosphore sont plus prononcés que ceux que nous avons pu noter en taux de potassium.

Pour la culture de pomme de terre, nous avons également enregistré des gains en taux de phosphore légèrement plus élevés que pour le potassium. Rappelons que ces résultats concernent uniquement l'essai (2) sans fertilisation minérale (Figure 4.17).

Selon ROUSSELLE et al [156] les cendres du tubercule (4 à 6% du poids de la matière sèche) sont constituées d'une vingtaine de minéraux. Le potassium en est l'élément dominant. La teneur en minéraux dépend largement de la composition chimique du sol ainsi les gains en taux de phosphore et potassium (au niveau de la rhizosphère) produits par les bactéries enrichiront le tubercule en ces éléments (P et K).

Cependant selon les normes d'interprétation [163, 164, 165, 166, 167], les valeurs obtenues pour les deux cultures (> 56 ppm pour le phosphore et > 1 meq/100g pour le potassium) montrent que le sol étudié est très riche en Phosphore et potassium et les gains enregistrés sont très faibles. La richesse du sol en éléments minéraux ne nous permet pas d'apprécier réellement l'effet bactérien sur la solubilisation de ces éléments. Les faibles gains notés peuvent être dus à cette richesse en P et K qui a réprimé cette capacité chez les souches bactériennes.

Ces résultats nous permettent de suggérer une diminution de la quantité d'engrais habituellement utilisée en la combinant avec une inoculation adéquate des *Pseudomonas* spp fluorescents pour une meilleure optimisation de la dose de fertilisant additionnée aux cultures (sans aucune perte sous des formes insolubles).

En comparant les gains enregistrés pour les deux espèces (tomate et pomme de terre), la culture de tomate semble montrer des gains plus importants, cette différence peut avoir plusieurs explications :

- Les notations sont faites à des stades jeunes et poursuivies tout au long de son cycle, alors que pour la culture de pomme de terre le suivi a été réalisé uniquement à la période de récolte de tubercule c'est-à-dire 120 jours après la plantation. Cet essai étant réalisé en plein champ les conditions climatiques (pluie, grêle, vent...) ne permettaient pas de faire un suivi régulier de la croissance et du développement des plants de pomme de terre tout au long de leur cycle.
- La tomate étant cultivée sous serre, les conditions environnementales peuvent être considérées comme semi contrôlées par rapport aux conditions qui

règnent sur le terrain de pomme de terre en plein champ, ainsi sous serre les souches bactériennes peuvent se trouver dans un environnement beaucoup plus favorable que celui du terrain. Selon HOWIE et al [173], pour la même espèce, une variabilité dans l'activité de promotion de la croissance de la pomme de terre par *Pseudomonas* spp fluorescents a été observée entre la serre plastique et les essais en plein champ. Les relevés météorologiques (Appendice D) démontrent l'existence d'une différence en température, humidité, évapotranspiration entre la serre et le terrain qui a favorisé la culture de tomate par rapport à celle de la pomme de terre et par voie de conséquence l'effet de certaines souches bactériennes pour lesquelles ces conditions climatiques sont plus favorables.

– Les deux espèces étudiées bien qu'appartenant à la même famille botanique *Solanacées* sont profondément différentes surtout par leur physiologie, ceci contribuant à la création s'une spécificité entre plante et souches bactériennes [175, 22, 34, 61, 52, 37].

En effet LATOUR et al [34], ont montré dans une étude comparant les *Pseudomonas* fluorescents associées avec les racines de deux espèces végétales (tomate et lin) que les populations ne sont pas distribuées de manière aléatoire dans la rhizosphère. En plus les populations présentes sur les racines des deux espèces végétales étaient différentes dans leurs capacités à utiliser des composés organiques divers et à respirer l'azote, cette différence suggérait que la plante sélectionne des populations spécifiques de *Pseudomonas* spp fluorescents.

La tomate a montré un cycle végétatif long (huit mois), où la reproduction est sexuée et la partie consommée est un fruit ; Les variétés utilisées (Nedjma et Agora) sont à port indéterminé : la plante ne cesse pas de croître en hauteur jusqu'à épuisement de toutes les réserves, produisant jusqu'à 15 bouquets floraux ; elle requiert une taille à une seule tige en supprimant les bourgeons latéraux et nécessite un pincement de l'apex au moment propice [181].

La pomme de terre quant à elle possède un cycle plus court (quatre mois), la reproduction est végétative (asexuée), elle ne fleurit pas (dans le cas de la variété SPUNTA) et la partie consommée est une tige souterraine (le tubercule). La croissance du germe est influencée par plusieurs facteurs du milieu :

hygrométrie, lumière et température. Les germes poursuivent leur croissance au-dessus du sol en devenant des tiges feuillées, ce qui rend assez rapidement la plante autotrophe et au dessous du sol pour donner les stolons [156].

D'après DU JARDIN [182], les hormones végétales (élaborés par le feuillage et par le tubercule mère) jouent un rôle complexe dans ce processus, assurant probablement à la fois la transmission des stimuli environnementaux aux différents niveaux de l'organisation de la plante et conditionnant la réceptivité des tissus et cellules à ces stimuli.

Des gains plus fréquents sont notés pour l'effet simple des souches bactériennes, alors que pour l'effet interactif des deux facteurs étudiés les gains semblent plus importants en valeurs. Ceci explique l'existence d'une interaction positive et une spécificité entre les souches bactériennes et le génotype des deux variétés de tomate [22, 1, 34, 61, 52, 37] et entre ces mêmes souches et la richesse du sol en éléments minéraux. [183, 184]

Pour l'effet simple des souches bactériennes sur la culture de tomate nous constatons dans l'ensemble que les souches de référence CHAO et C7R12 (un maximum de 60 % et 48.23 %) ont montré des gains plus élevés comparé aux souches locales P64 (39.22 %) et S20 (47.84 %) et c'est la souche CK4 (20.44 %) déficiente en pyoverdine qui a montré très peu de gains sur l'ensemble des paramètres étudiés (Appendice M).

Des études menées en condition contrôlées ont montré en effet des gains en levée plus importants avec les souches CHAO (55.53 %) que la souche P64 (30.53%) après leur application sur les semences de la tomate [176]. Selon JOUSSET et al [144], la souche bactérienne CHAO est un colonisateur commun des racines de plantes, par ses propriétés elle améliore les performances des plantes et leur résistance aux pathogènes des racines.

Les souches CHAO et C7R12 ont été obtenues à partir de la rhizosphère de la plante du tabac et de la tomate, donc à la même famille botanique des *Solanacées*, ce qui semble faciliter leur adaptation à la culture de tomate sous serre en favorisant leur effet bénéfique.

L'un des modes d'action les plus importants des *Pseudomonas* est l'acquisition du fer au moyen de la sécrétion des pyoverdines, l'absence de cette capacité chez la souche CK4 peut expliquer les faibles gains enregistrés. D'après LEMANCEAU [22], les sidérophores microbiens et en particulier ceux des *Pseudomonas* spp fluorescents peuvent influencer directement l'alimentation de la plante en fer. Ainsi le fer chélaté par les sidérophores peut être utilisé par les graminées (par exemple). Il a été montré que la tomate n'absorbe le fer de façon efficace que si elle est cultivée en présence de ces bactéries.

En effet dans des études menées avec des *Pseudomonas* spp fluorescents, les souches mutantes sans pyoverdines n'ont pas eu un effet bénéfique sur croissance des plantes bien qu'ils colonisent la racine avec la même efficacité que la souche sauvage [22, 127].

Les gains notés chez la souche CK4 mêmes très faibles prouvent que les souches bactériennes ont la capacité de stimuler la croissance des plantes en l'absence des sidérophores et ceci en utilisant d'autres mécanismes.

Par ailleurs, selon HIFTE et al [115] et VESSEY [15], il y a une contradiction concernant la signification du prélèvement bactérien du complexe  $Fe^{3+}$  - sidérophore pour la nutrition en fer des plantes. Tandis que certains croient que cette contribution des sidérophores aux besoins généraux de la plante est faible, d'autre leur attribuent un rôle important, et même un rôle essentiel, particulièrement dans les sols calcaires.

Un résultat différent est obtenu pour la culture de pomme de terre, c'est la souche S20 qui a engendré beaucoup plus de gains (18.48 %). La souche S20 est issue de la rhizosphère d'une palmeraie à Ghardaïa, cependant les conditions climatiques et édaphiques du terrain de pomme de terre semblent stimuler le développement de cette souche et son effet bénéfique sur les différents paramètres étudiés.

Les souches CHAO (16.40 %), C7R12 (26.09 %), CK4 (16.66 %) et P64 (8.70 %) ont montré des gains tantôt inférieurs et tantôt supérieurs à ceux de la souche S20, mais moins fréquents et donc moins stables (Appendice P).

La souche P64 est isolée à partir de la rhizosphère de l'abricotier, c'est une espèce très différente du point de vue botanique de la plante hôte (pomme de terre) à laquelle elle a été inoculée, ce ci peut expliquer les faibles résultats obtenus.

Notons que les souches modèles CHAO et C7R12 ont donné de meilleurs résultats sous serre qu'en plein champ. Les conditions qui règnent en plein champ stimulent moins l'effet positif de ces souches qui sont adaptées à des conditions contrôlées se rapprochant de celles de la serre.

En examinant les gains des paramètres étudiés présentés par les cinq souches, nous avons constaté que la stimulation des souches variait entre l'effet simple de la bactérisation et de l'interaction des deux facteurs étudiés. Ainsi chez la culture de tomate, pour l'effet simple c'est la souche CHAO qui donne les meilleurs résultats alors que pour l'interaction c'est la souche P64 pour la variété Nedjma et la souche S20 pour la variété Agora.

Pour la culture de pomme de terre, la souche S20 a présenté les meilleurs résultats pour l'effet simple des bactéries alors que pour l'effet interactif ce sont les souches modèles C7R12 (pour l'essai 1 avec fertilisation) et CHAO (pour l'essai 2 sans fertilisation) qui ont montré les gains les plus élevés.

Ces variations peuvent être expliquées par une addition des résultats obtenus chez les deux variétés (ou les deux essais) que nous retrouvons au niveau des résultats de l'effet simple de la bactérisation.

L'instabilité de l'effet bénéfique des souches peut être expliquer également par le fait qu'en condition non contrôlées, plusieurs facteurs interagissent en créant à chaque période plus ou moins courte un environnement différents qui influence directement ou indirectement l'action des souches bactériennes sur les plantes. Ceci s'oppose à la répétitivité des effets des souches bactériennes tout au long des cycles de culture. En effet l'effet positif des souches de PGPR est très

influencé par les conditions du milieu environnant. Leur action est positive, neutre et même négative selon les conditions environnementales. Plusieurs études ont examiné l'effet de certains facteurs abiotiques sur les PGPR (*Pseudomonas* spp fluorescents) et leur activité de biostimulation des plantes.

LEMANCEAU [22] signale que pour déterminer des effets bénéfiques, les *Pseudomonas* doivent rencontrer un environnement favorable à l'expression de leurs activités spécifiques intéressantes et à leur survie. Le pH, la teneur en eau du sol, l'importance du complexe absorbant sont des facteurs régulateurs essentiels, mais la température semble être la plus importante [1, 76]. La température est un facteur abiotique important qui joue un rôle considérable dans l'interaction plante – rhizobactéries. Il a été montré que la température augmente le processus métabolique et la biomasse des plantes et des bactéries. Elle peut influencer le taux de croissance bactérien, la production de pyoverdines, la mobilité, la dynamique bactérienne et la colonisation de la rhizosphère [68, 22, 127, 1].

Les caractéristiques physiques et chimiques du sol ; texture sableuse, sol riche en matière organique et peu calcaire, pH neutre à basique (Appendice B) semblent être très favorables au développement et à la colonisation de certaines souches bactériennes plus que d'autres et de ce fait à l'expression de leur effet de promotion de la croissance des cultures. Le sol joue un rôle important sur les populations associées au système racinaire. La survie de différentes souches de *Pseudomonas* spp fluorescents introduites variait avec le sol et les différentes textures [34, 73, 23].

Les résultats obtenus chez les deux variétés concordent avec les différentes études qui ont montré que la stimulation de la croissance est réalisée par la jonction de différents mécanismes. L'absence de l'un ou l'autre chez l'une des souches n'affecte pas considérablement sa capacité dont l'importance diffère selon les conditions environnementales (plante hôte, sol, climat) et les caractères génétiques de la bactéries.

L'étude de l'interaction des souches bactériennes avec les deux variétés de tomate a mis en évidence des gains sensiblement plus importants tantôt chez la

variété Nedjma (V1) et tantôt chez la variété Agora (V2) suivant les différentes phases du cycle de la culture. (Appendice N). Notons que les effets positifs les plus marqués des souches bactériennes sont également exprimés durant les stades juvéniles des espèces végétales [179, 175, 22, 38].

Fait marquant entre les deux variétés de tomate où il semble plus de phytostimulation chez la variété Nedjma en paramètre de croissance, en paramètres de production et en taux de phosphore. Cependant l'étude des gains en taux de levée a montré que la variété Agora semble plus stimulée par la bactérisation que la variété Nedjma ; les gains sont plus fréquents et plus élevés chez la variété Agora. C'est également le cas pour le taux des protéines totales, car des gains nettement plus faibles sont enregistrés chez la variété Nedjma, le métabolisme protéique de la variété Agora semble être mieux stimulé par les souches bactériennes.

Cette différence peut être expliquée comme étant relative au génotype végétal. Ces interactions positives (entre les deux facteurs) prouvent l'existence d'une spécificité entre ces variétés et les souches bactériennes.

Plusieurs études confirment la relation spécifique entre les rhizobactéries et le génotype des plantes qui peut varier au cours du cycle de la plante. DIGAT [175] signale que le succès de la promotion est tributaire de la bactérie elle-même mais aussi de la plante et des facteurs de l'environnement (biotique et abiotique). TOURAINE et al [37] signalent que la spécificité qui s'opère entre un PGPR et une espèce végétale est en grande partie due aux racines des plantes, plus précisément aux rhizodépôts.

Les racines sont connues pour libérer plusieurs substances dans la rhizosphère, appelées la rhizodépôt ; des composés organiques (carbonés et azotés : acides aminés, polysaccharides, acides organiques, protéines). La quantité et la composition de ces composés organiques sont différentes suivant l'espèce végétale (maïs, pois, tomate, etc. et les différents cultivars) et sont influencés par la physiologie, les stades du développement des plantes (l'âge des plantes) et les interactions microbiennes. Ainsi la rhizosphère n'est pas statique ; elle varie avec le temps et dans l'espace [1, 72, 61, 52, 84, 75, 60, 71, 76, 67].

Concernant la culture de pomme de terre, l'effet de l'interaction de la bactérisation avec la fertilisation minérale semble donné des gains plus élevés en paramètres de croissance, car la présence d'éléments minéraux (Azote, Phosphore et Potassium) dans le sol apportés par la fertilisation (environ 50 kg de NPK, 11 kg d'urée, 22 kg de potasse), stimule l'effet bénéfique des souches bactériennes et favorise ainsi la culture de pomme de terre (Appendice Q). ROUSSELLE et al [156] signalent que la pomme de terre se classe parmi les plantes très exigeantes en azote, phosphore et potassium.

Pour le taux de protéines totales, les gains sont différents au niveau des feuilles et des tubercules. En effet pour les protéines contenues dans les feuilles, un gain plus important est noté pour l'essai 1 (avec fertilisation minérale) par rapport à celui de l'essai 2 (sans fertilisation minérale), alors que pour les protéines contenues dans les tubercules le gain noté pour l'essai 2 est le plus élevé. Il faut noter que le dosage des protéines à partir des feuilles est réalisé au stade de tubérisation.

Plusieurs auteurs ont étudié la physiologie de tubérisation, cette dernière dépend de l'interaction entre des facteurs génotypiques (le tubercule mère et le feuillage) et environnementaux. Parmi les facteurs environnementaux, la photopériode, la qualité de la lumière, la température et la nutrition minérale (azotée en particulier) sont reconnues comme généralement déterminantes [182, 156].

Dans notre étude deux facteurs supplémentaires intervenaient sur la tubérisation à savoir l'action des éléments fertilisants et celle des souches bactériennes. Cette interaction était positive à 90 jours après plantation car des gains importants sont notés au niveau des feuilles. Elle est devenue cependant neutre au cours du temps pour ne monter aucun effet sur le taux de protéines contenus dans les tubercules au moment de leur récolte (120 jours après plantation). Cette différence dans les résultats peut être attribué d'une part à la complexité des mécanismes biologiques mais aussi à l'âge des plants, car il a été montré dans plusieurs études que des gains notables sont enregistrés surtout à des stades jeunes [179, 175, 22, 38].

Plusieurs études ont montré que la fertilisation minérale diminuait en général la richesse en rhizobactéries indigènes mais favorise en particulier l'effet bénéfique des PGPR introduite comme les *Pseudomonas* spp fluorescents [74, 75, 183]. Une étude menée par RAMEZANPOUR et al [184] a montré que les semences de blé inoculées avec des PGPR (*Pseudomonas* et *Azotobacter*) en présence d'une fertilisation NPK révèle une augmentation du rendement et une amélioration des propriétés physiologiques (taux d'azote, de Fer, de Chlorophylle, de Carbone et de Protéine, les activités de réductase des nitrates) et des propriétés morphologiques comme le tillage et la biomasse par rapport au témoin fertilisé sans inoculation.

PARKE [91] rapporte qu'une étude de la dynamique de population de la souche introduite revête une importance critique dans la réalisation de la promotion de croissance. En effet la colonisation racinaire est une condition primordiale de la réussite des travaux de phytostimulation.

Dans notre expérimentation, les résultats de la dynamique des populations ont montré une augmentation de la concentration bactérienne dans la rhizosphère et sur les racines par rapport à la concentration initiale. Ceci prouve une forte colonisation rhizosphérique et racinaire des populations bactériennes et leur survie pendant toute la durée du cycle végétatif des plantes (Figures 3.17, 4.9).

Selon BEAUCHAMP et al [174] et PARKE [91], la colonisation racinaire est considérée comme un facteur majeur dans le succès de l'inoculation et dans la promotion de la croissance ; elle revête de ce fait une importance fondamentale. D'après KLOPPER et al [185], il existe une corrélation directe entre la colonisation des racines par les souches introduites de *Pseudomonas* et l'accroissement de la biomasse des plantes [38].

Le succès de la colonisation racinaire dépend de plusieurs facteurs : des caractéristiques des bactéries introduites, de la microflore du sol, de la plante hôte et de l'environnement abiotique. La colonisation bactérienne est influencée également par la texture du sol, la technique d'irrigation joue aussi un rôle déterminant. La percolation de l'eau contribue à améliorer la distribution des

bactéries le long de la racine et à augmenter leur densité à l'extrémité des racines [91, 22].

Notons que les résultats obtenus pour les deux cultures étaient largement supérieurs par rapport au seuil que SCHER et al [186] considèrent comme un bon indice de la réussite de la colonisation racinaire ( $5.10^3$  cfu /g de sol) [176] (Tableaux 3.14, 4.6).

En effet Bien qu'une souche particulière puisse coloniser les racines, une considération plus importante est attribuée à la densité de population qui doit être suffisamment élevée à la période et l'endroit appropriés pour permettre leur action sur la croissance des plantes [91, 81, 59].

La méthode d'inoculation utilisée dans nos essais semble être très favorable à une colonisation intense des bactéries car ces dernières sont placés dans la rhizosphère potentielle avant même l'apparition des racines, ainsi dès leur sortie, les souches bactériennes sont les premières à adhérer et à se multiplier d'où les valeurs élevées des concentrations bactériennes.

Chez la culture de pomme de terre, une différence est notée entre les deux essais, ainsi l'essai sans fertilisation a montré des concentrations relatives plus élevées que celles notées pour l'essai enrichi en éléments fertilisants à partir de la rhizosphère et des racines (Tableau 4.6). Ces résultats montre finalement qu'en conditions défavorables (rhizosphère pauvre en élément minéraux), les souches bactériennes semblent se multiplier et coloniser activement la rhizosphère.

Des résultats similaires ont été signalé dans une étude réalisé par DE FREITAS et al [93], car en étudiant les capacités de certaines souches de *Pseudomonas* comme PGPR ces auteurs ont conclu que les inoculums de *Pseudomonas* ont colonisé les racines du blé d'hiver et ont survécu dans la rhizosphère, même en condition extrêmement difficiles à la fin de l'hiver.

Les concentrations bactériennes notées dans nos expériences étaient légèrement différentes d'une souche à une autre. Plusieurs auteurs ont montré aussi que les souches bactériennes d'une seule espèce ne colonisaient pas la

rhizosphère avec la même intensité. D'après LEMANCEAU [22], le maintien et le développement d'une souche bactérienne introduite sont conditionnés par la capacité d'accueil de la rhizosphère. En outre certaines souches bactériennes présentent une aptitude compétitrice supérieure à d'autres. Ces caractéristiques ne semblent liées ni à la production de sidérophores ni à la production d'antibiotique. ; Les mutants non producteurs de ces métabolites paraissent en effet coloniser la rhizosphère aussi bien que les souches sauvages.

Ainsi, La compétence rhizosphérique des *Pseudomonas* spp fluorescents varie d'une souche à l'autre. Des résultats obtenus avec plusieurs souches de *Pseudomonas fluorescens* indiquent clairement la haute diversité des souches pour leur compétitivité dans la rhizosphère de tomate. En effet le taux de survie des souches varie de 0.11% pour la souche le moins compétitive à 61.4% pour la souche la plus compétitive [23].

Plusieurs auteurs [22, 1, 23] ont étudié les caractéristiques bactériennes qui conditionnent la bonne compétence rhizosphérique des souches de *Pseudomonas* spp fluorescents, elles semblent liées à l'aptitude des souches à :

- s'attacher à la racine suite à la perception d'un signal chimique (le chimiotactisme) ; l'adhésion des bactéries à la racine constitue une composante importante de la colonisation racinaire.
- se multiplier et se déplacer vers et le long de la racine.
- entrer en compétition de façon efficace avec la microflore résidente

Le Quorum sensing (QS) est un système de régulation par les gènes qui s'opère via la production de molécules signal; la concentration de ces dernières augmente avec la densité de la population bactérienne et en atteignant des seuils limites, la bactérie réagit par l'adaptation de l'expression des gènes. Chez les bactéries Gram-négatif comme les *Pseudomonas*, un système QS typique est souvent impliqué dépendant de la production et la réponse à une homoserine lactone acylaté (AHL) [94, 28, 86, 95, 187].

STEINDLER et al [187] signalent que la colonisation racinaire des *Pseudomonas* dans la rhizosphère est régulée par le quorum sensing, cependant très peu d'études ont fait cette association. Le type de régulation est spécifique à chaque espèce.

La stimulation de la croissance des plantes par les souches de PGPR a été attribuée à une multitude de mécanismes complémentaires qui contribuent à son efficacité :

- Augmentation de la mobilisation des éléments nutritifs insolubles (l'azote et les éléments minéraux P, K et Fe) et amélioration par conséquent de leur prélèvement par la plante favorisant ainsi la croissance [133, 35, 31, 27, 15, 40, 24, 41, 42].
- Production de régulateurs de croissance identiques à ceux des plantes organisant de ce fait directement leur physiologie [133, 35, 31, 27, 15, 40, 24, 41, 42].
- Suppression des bactéries délétères du sol et des champignons phytopathogènes [133, 35, 31].

Lorsque des souches de *Pseudomonas* spp fluorescents sont utilisées comme un bioinoculum du sol, leur efficacité à améliorer la croissance des plantes dépend de leur aptitude à produire certains métabolites (sidérophores, antibiotiques, substances de croissance, etc.) et à solubiliser le phosphore et le potassium [22, 126, 83, 106, 23, 26, 15, 123, 24, 118]. La synthèse bactérienne des hormones de plantes inclut ; l'acide indole-3-acétique, cytokinine, gibbérelline, la diminution ou l'arrêt de la production de l'éthylène (inhibiteur de la croissance des racines) par les plantes. Cette dernière action est régulée par la production bactérienne de 1-aminocyclopropane- 1-carboxylate deaminase (AAC) [27, 28, 37].

Dans la rhizosphère, la situation est en fait très complexe et plusieurs observations donnent à penser que la frontière entre microorganismes délétères et auxiliaires est complexe et dépend directement de l'environnement régulant sa

synthèse et sa concentration. Les mêmes métabolites peuvent en effet conduire à des résultats totalement opposés (bénéfiques ou néfastes) [188, 64, 22, 1]. Certains auteurs avancent que la stimulation de la croissance de la plante par la bactérie introduite peut être amoindrie ou annulée par la perte d'autres fonctions favorables à la plante assurées par les communautés indigènes si ces dernières sont modifiées par l'organisme inoculé [36].

BERGGREN et al [51] déclarent que les pratiques culturales, l'état nutritif, les populations microbiennes, la température du sol et le génotype des plantes influencent la capacité de certaines souches bactériennes à exprimer des effets délétères. Ainsi, dans une série d'expériences, ces chercheurs ont montré que sous différentes conditions environnementales (stériles et non stériles), certaines souches de *Pseudomonas* peuvent avoir un impact négatif sur le développement et la morphologie de racine avec une réduction notable de biomasse de racine et des déformations du chevelu racinaire sur des jeunes plantes de pois. Le mode d'action donnant l'effet délétère est différent d'une souche à une autre.

L'application des bactéries bénéfiques (PGPR) présente une approche respectueuse de l'environnement, peu coûteuse et est une alternative prometteuse aux fertilisants chimiques conventionnels pour l'amélioration de la productivité des cultures. Les bactéries PGPR sont utilisées comme inoculums pour la biofertilisation, la phytostimulation et le biocontrôle [32, 42, 43].

Le développement de ce créneau est confronté à deux problèmes majeurs : le manque de reproductibilité des effets bénéfiques et la difficulté de la commercialisation de ces produits. L'absence de réponses constantes chez différents cultivars hôtes et au niveau de différents sites sont les raisons principales limitant une commercialisation plus répandue des PGPR biofertilisants [15, 21], car pour atteindre le marché et pour être concurrentiel avec les produits chimiques (pesticides et fertilisants), une efficacité cohérente et fiable et une plus longue durée de la période de conservation doivent être maîtrisées [13, 32].

La commercialisation des produits à base de PGPR débute avec le développement technique d'une production en masse, le stockage (conservation), le transport et la technologie d'application, mais elle doit prendre en compte

également les stratégies pour une introduction rapide sur les marchés [13, 32, 189].

Selon CARON [137], ces alternatives (biopesticides, biofertilisants) tardent à s'implanter sur le marché et demeurent en grande partie des solutions de rechange souhaitées plutôt que réelles. Les raisons les plus évoquées concernent leur formulation et la législation d'homologation régissant leur conception et application. D'autre part, FROMIN et al [81], BLOEMBERG et al [58], GAMALERO et al [52] et HUMPHRIS et al [59] rapportent que les résultats décevants de l'inoculation d'espèces bactériennes bénéfiques obtenu en plein champ sont souvent corrélés avec une faible colonisation des racines par les bactéries. KATIYAR et al [106] précisent que le succès d'un PGPR introduit pour la solubilisation de phosphate est lié à sa capacité à coloniser aisément les racines des plantes.

Chez les *Pseudomonas* spp fluorescents, LATOUR et al [23] signalent que leur utilisation dans les conditions naturelles est parfois inconséquente, cette situation est partiellement associée à l'incapacité des bactéries introduites à survivre dans la rhizosphère, d'où la nécessité de sélectionner des souches spécifiques et de comprendre les mécanismes responsables des effets bénéfiques [189].

Certains aspects importants des interactions plante – PGPR ne sont toujours pas bien élucidés, comme l'influence de l'état nutritionnel de la plante sur l'attraction des rhizobactéries et sur les processus de promotion de la plante, par exemple la colonisation bactérienne de la rhizosphère, l'assimilation des nutriments et la production des phytohormones [32].

Dans la plupart des études pour évaluer l'effet des PGPR sur la croissance des plantes de nombreux paramètres sont utilisés tels que la longueur des tiges et des racines, le poids sec, le nombre de feuilles, le nombre de fleurs et des fruits, etc. cependant ils ne déterminent pas comment est affectée l'expression génétiques des plantes traités avec les PGPR. Des résultats de recherches basés sur des techniques de spectrophotométrie de masse et sur l'hybridation de ARNm

extraits à des microarrays de l'ADNc de plusieurs cultures peuvent mettre en évidence l'utilisation sérieuse des PGPR en agriculture [190].

Le développement scientifique de la sélection, de la production et de la formulation de ces microorganismes peut résoudre ces problèmes [40, 13, 32, 189]. Selon DAVET [1], la production de l'inoculum implique un travail de sélection qui consiste à exploiter la variabilité des espèces et à choisir la souche la plus intéressante parmi une collection aussi large que possible. Cette sélection doit respecter trois critères importants ; la compétitivité, l'innocuité et la compatibilité.

Un facteur critique doit être considéré en sélectionnant un inoculum bactérien pour le développement commercial, est la disponibilité d'une production rentable et une technologie qui produit la forme la plus stable en diminuant les coûts de production. Des études plus poussées sur les aspects pratiques de la production en série (en masse) et de la formulation doivent être entreprises [1, 13].

SPADARO et al [13] signalent que le système de production, la formulation et les méthodes d'application (traitement du sol et des graines ou des solutions nutritifs hydroponiques) sont cruciaux pour maintenir et améliorer l'efficacité des inoculums bactériens.

La formulation doit apporter comme avantages ; une plus grande efficacité, durée de vie de l'inoculum augmentée, une facilité de la manipulation et une compatibilité avec des pratiques agricoles. Le type de formulation dépend de l'utilisation prévue. Pour l'application aux cultures hors- sol la manière la plus facile est d'ajouter l'inoculum par le système d'irrigation, une formulation liquide serait préférée. Une formulation granulaire est plus appropriée pour être ajoutée en pot, tandis qu'une poudre mouillable sera plus adéquate pour le traitement (immersion) des racines des semences ou des sols [1, 13].

## CONCLUSION

Le but de cette étude est de mettre en évidence les effets bénéfiques des rhizobactéries *Pseudomonas fluorescens* sur la croissance ainsi que sur la production des cultures de tomate et de pomme de terre. Les expérimentations ont été réalisées dans des conditions naturelles au niveau de la station expérimentale de l'institut technique des cultures maraîchères et industrielles à Staoueli (ITCMI).

Les effets de phytostimulation ont été évalués par comparaison de la croissance et la production des plants bactérisés aux témoins non bactérisés. Globalement, sur ces deux cultures des effets bénéfiques notables ont été enregistrés.

Pour la culture de tomate, des gains en taux de germination de 10 à 23 jours ont été notés en plus de la phytostimulation de la croissance (de 1,37 à 60,34 %) relative à la phytomasse aérienne et souterraine (hauteur des plants, longueur des racines, poids frais de la partie aérienne, poids frais et sec de la partie souterraine, nombre de feuilles). En paramètres de production (poids moyen du fruit et poids total des fruits par plant), des gains d'un maximum de 148.86 % ont été notés. Les dosages des protéines totales des éléments minéraux (phosphore et potassium) ont révélé des accroissements allant jusqu'à 27, 71 %.

Pour la culture de pomme de terre, la cinétique de la germination a également été activée permettant d'avancer la levée des plantules de 7 à 14 jours par rapport aux tubercules non bactérisés. Les gains, comparativement à ceux obtenus chez la culture de tomate sont moindres, mais restent notables en terme de stimulation de la croissance des plants de pomme de terre. Cette stimulation a été surtout significative dans le cas de certains paramètres de croissance (jusqu'à 44,45 %) notamment en diamètre des tiges et poids frais de la partie aérienne et

en taux de protéines totales (50 %) et d'éléments minéraux (phosphore et potassium) (20 %) dans la rhizosphère.

L'effet des cinq souches était aléatoire selon les cultures et les paramètres étudiés ; aucune des cinq souches n'a montré un effet positif constant durant tout le cycle des plantes. L'étude de la dynamique des populations a révélé une augmentation des concentrations bactériennes dans la rhizosphère par rapport à la concentration initiale, indiquant une adaptation des souches inoculées et leur forte colonisation rhizosphérique.

Les effets bénéfiques, engendrés par les rhizobactéries phytostimulatrices de la croissance végétale, sont tributaires des conditions expérimentales, globalement il en ressort des effets plus quantifiables en conditions contrôlées. En comparant les résultats obtenus dans notre étude, effectuée dans des conditions pratiques de conduite de cultures, par rapport à ceux enregistrés avec ces mêmes souches dans des conditions contrôlées [38, 143, 176, 149, 152, 168, 153], nous constatons une moindre importance des effets bénéfiques générés. Notons que peu de travaux de recherche sont réalisés en conditions pratiques.

Néanmoins, les niveaux de phytostimulation restent appréciables et annonciateurs d'une possible exploitation de ces effets microbiens positifs dans la conduite des cultures. Ceci permettra d'envisager d'éventuelles applications tout en essayant d'améliorer notre compréhension des mécanismes et des facteurs garantissant l'expression des effets bénéfiques dans de telles conditions (conditions pratiques)

La complexité de l'interaction plante – sol – rhizobactérie sont si diverses, qu'une compréhension aussi complète que possible de toutes les relations impliquées est loin d'être réalisée, même dans une production monoculture. Des études plus poussées pour la compréhension de la biodiversité et des fonctions de mutualisme et d'antagonisme des microorganismes de la rhizosphère sont à réaliser pour remédier à ces lacunes et ouvrir ainsi de nouveaux horizons pour leur exploitation pour une agriculture durable et respectueuse de l'environnement.

La reproduction et la stabilité des effets stimulateurs sont des conditions indispensables à l'application de ces rhizobactéries à grande échelle.

En dépit de ces lacunes, les progrès réalisés permettent dès maintenant d'améliorer l'efficacité et la reproductibilité des gains en croissance et des augmentations du rendement des cultures bactérisées. Plusieurs auteurs ont discuté différentes stratégies pour améliorer l'efficacité de l'utilisation des rhizobactéries PGPR dans une pratique agricole, visant particulièrement les critères de sélection des souches, assurant différents mécanismes d'action, douées de potentialités stables, reproductibles et adaptées aux différents types de cultures.

La co-inoculation avec différents microorganismes, aux propriétés complémentaires et une meilleure combinaison des inoculums bactériens avec l'application des produits chimiques, des méthodes physiques (solarisation ou stérilisation à la vapeur) et des pratiques agronomiques (cas des systèmes hors-sol), sont des voies à adopter pour augmenter les chances de réussite de ces applications microbiennes.

En plus des problèmes pratiques rencontrés dans la sélection de souches avec potentiel colonisateur, la formulation des inoculums microbiens répondant aux exigences pratiques et compatibles avec la conduite des cultures est en voie d'investigation.

Actuellement, il existe une gamme de produits inoculums bactériens qui sont commercialisés avec succès pour l'agriculture, avec les améliorations que peuvent apporter les biotechnologies modernes, il est vraisemblable que l'avenir verra une plus grande utilisation de ces produits dans l'agriculture et les stratégies de gestion agronomique.

L'utilisation des rhizobactéries PGPR constitue une solution économiquement rentable. Ces pratiques prennent souvent du temps, ils se manifestent rarement à court terme contrairement à un apport d'engrais qui un résultat immédiat. Cependant les modifications des équilibres microbiens, si elles sont lentes, sont également durables ; lorsqu'une population de rhizobactéries est

bien installée dans un sol il est inutile de renouveler régulièrement les apports d'inoculum.

L'Algérie malgré ses richesses et ses potentialités connaît une faible utilisation des engrais chimiques (N, P, K). L'utilisation semble se stabiliser autour de 100 000 tonnes d'éléments fertilisants environ par an alors que, selon la moyenne mondiale et les normes d'intensification des cultures et d'amélioration de la productivité, la consommation devrait se situer à 850 000 tonnes par an [30]. Ainsi pour l'Algérie, la faible utilisation des engrais chimiques peut être un atout très intéressant pour l'introduction, en parallèle, de microorganismes bénéfiques dans les systèmes agricoles afin de solubiliser les éléments nutritifs, d'enrichir les sols en ces éléments et améliorer ce secteur.

## APPENDICES

### Appendice A

#### Milieu de culture King B

Le milieu utilisé pour la mise en culture et la purification des souches bactériennes de *Pseudomonas fluorescent* est le milieu King B. C'est un milieu de culture préparé (gélose base) à Institut Pasteur d'Algérie, sous une forme déshydratée.

43 g de poudre Gélose King B est dissoute dans 1 litre d'eau distillée. Le mélange est mis à bouillir sur une plaque chauffante à agitateur puis versé dans des flacons de 250 ml en verre et stérilisé dans un autoclave jusqu'à 120 °C pendant 20 minutes.

La formule en g/l d'eau distillée :

- Peptone	20g
- Agar	20g
- Phosphate dipotassique	1.5g
- Sulfate de magnésium	1.5g

## APPENDICE B

## Analyse du sol

L'échantillon	sol culture de tomate	Sol culture de pomme de terre
Les dosages		
Dosage de la matière organique : <b>Méthode ANNE</b>	2.69 % Sol riche 2.5 -6.0 %	1.69 %, Sol moyennement pourvu 1.5-2.5 %
Dosage du calcaire total : <b>Méthode du calcimètre BERNARD</b>	5.56 Sol peu calcaire ; entre 5% et 10 %	4.55 %, Sol légèrement pourvu inf à 5%
Détermination du pH : <b>Méthode électrométrique</b>	7.47 sol neutre entre 6.5-7.5	8.31 sol fortement basique 8.0-8.5
Détermination de la conductivité électrique <b>USDA ; Laboratoire RIVERSIDE</b>	0.1843 mmhos/cm sol salé	0.578 mmhos/cm sol non salé
Détermination de la granulométrie : <b>Méthode pipette ROBINSON</b>	Argile : 4.18 %	Argile : 5.18 %
	Limon fin : 2.16 %	Limon fin : 1.91 %
	Limon grossier : 2.70 %	Limon grossier : 1.96 %
	Sable fin : 11.09	Sable fin : 16.53 %
	Sable grossier : 79.43 %	Sable grossier : 74.39 %
	Texture sableuse	Texture sableuse
Détermination du taux d P2O5 assimilable : <b>Méthode OLSEN</b>	114 ppm sol excessivement riche.	322 ppm, sol excessivement riche.
Détermination du taux de K+ échangeable : <b>Méthode METSON</b>	0.76 meq K/100 g de sol, sol teneur élevée.	1.32 meq K/100 g de sol, sol teneur très élevée.
Détermination de l'humidité à la capacité au champ	6.993%	10.34%
Détermination de l'humidité hygroscopique	1.24%	0.954%

## APPENDICE C

## Analyse de l'eau d'irrigation

Elément	unité	valeurs
Calcium	mg/l	177
Magnésium	mg/l	24
Sodium	mg/l	98
Potassium	mg/l	0
Phosphates	mg/l	0.312
Nitrates	mg/l	54.0
Chlorures	mg/l	138
Sulfates	mg/l	218
Bicarbonates	mg/l	340
carbonates	mg/l	0
OH <sup>-</sup>	mg/l	0
pH		7.9
C.E	mmhos	1.2
Résidus sec à 105°C	mg/l	963
TH	°F	54
TAC	°F	27
TA	°F	0

## APPENDICE D

## Données climatiques

Culture de tomate, sous serre (compagne 2006) :

Paramètres étudiés	Mois de l'année				
	février	mars	avril	mai	juin
Température de l'air : ° C moyenne maximale	28.7	32.7	28.7	30.32	29.97
Température de l'air : ° C moyenne minimale	09	12.25	15.3	18.80	19.20
Température du sol : ° C moyenne 09h	11	14.1	16.7	19.12	20.40
Température du sol : ° C moyenne 16h	12	16.2	18.8	21.5	22.27
Humidité de l'air : % moyenne maximale	90.9	93.29	92.5	87.90	92.07
Humidité de l'air : % moyenne minimale	43	47.96	55.5	56.74	58.24
Evaporation E.V.A : mm	1.7		1.8	1.7	1.9

Culture de pomme de terre, en plein champ (compagne 2006) :

Paramètres étudiés	Mois de l'année						
	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet
Température de l'air : ° C moyenne maximale	16.40	17.6	18.11	20.6	25.25	26.3	32
Température de l'air : ° C moyenne minimale	9.9	9.1	11.7	15.2	14.12	17.5	22
Humidité de l'air : % moyenne maximale	62.9	66	64.3	66.3	66.35	61.4	
Humidité de l'air : % moyenne minimale	29.81	26.7	26.5	22.3	24.58	14.5	
Vent : km/h	11.6	38.2	42.0	40.1	39.18	41.6	17.26
Evaporation E.V.A : mm	2.8	2.6	3.6	4.02	3.8	5.7	5.6
Pluviométrie : mm	3.14	9.9	2.9	0.65	20.93	0	0

## APPENDICE E

## Fiches techniques des variétés

## 1. Variété NEDJMA



Pureté : 99 %, Germination : 95%  
 description variétale : type hybride indéterminé  
 Emballage Sachet de 25 Gr  
 Tomato Nedjma est un produit: PS Petoseed (SEMINIS)

## CARACTERISTIQUES

## PLANTE :

- Plante de port très vigoureux.
- Très bon couvert végétal
- Feuillage bien aéré.
- La plante noue bien en hiver et ses fruits sont fermes. En culture de plein champ, elle résiste bien à la chaleur de l'été ainsi que les écarts de températures d'arrière saison.

## FRUIT :

- Globe, uniforme
- Collet légèrement vert et peu marqué.
- Coloration rouge vif.
- Poids moyen de 250 à 280g.
- Très bonne fermeté.
- Nombre de fruits par bouquet : 4 à 5 fruits

## PRECOCITE :

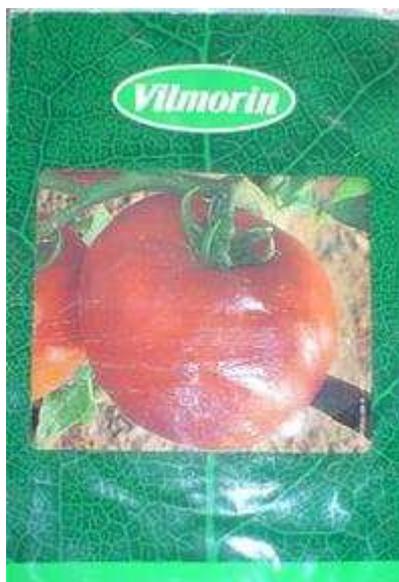
Demi précoce : 97 jours après repiquage.

## RESISTANCE :

Fusarium 2 races, Grown Rot, Virus de la mosaïque du tabac (T.M.V), Verticillium.

## APPENDICE E (suite)

## 2. Variété AGORA



Variété à gros fruits conseillée pour toutes cultures sur sol infesté de nématodes

Description variétale : type indéterminé

Emballage Sachet de 25 Gr & Boite de 50 Gr

Tomate AGORA est un produit: VILMORIN

#### CARACTERISTIQUES

##### PLANTE :

- Vigueur forte allée à une croissance rapide.
- Feuillage aéré.
- Enracinement fort.
- Très bonne rusticité
- Elle s'adapte Sous serre et plein champ

##### FRUIT :

- Rond.
- Collet vert s'estompant à maturité.
- Coloration régulière uniforme.
- Calibre très homogène.
- Bonne fermeté.
- Bonne résistance à l'éclatement.
- Nombre de fruits par bouquet : 5 à 6 fruits

##### PRECOCITE :

Variété moyennement précoce

##### RESISTANCE :

Virus de la mosaïque du tabac (T.M.V), Verticilium, Fusarium 2 races, Nématodes, Stemphylium.

## APPENDICE F

## Caractéristiques de la tourbe utilisée dans la préparation du substrat de tomate

VAM 50 I : terreau pour semis et bouturage (Hollande)

Support de culture NFU 44,551

Conductivité 450  $\mu\text{s}/\text{cm}$

Matière organique : 18%

Matière sèche 30%

pH (H<sub>2</sub>O) 5.0-6.5

Engrais NPK (14-16-18) avec oligoéléments 0.75 kg/m<sup>3</sup>

Engrais organique NPK (7-6-6) 1 kg/m<sup>3</sup>

Rétention en eau (matière sèche) 450 g/100 g

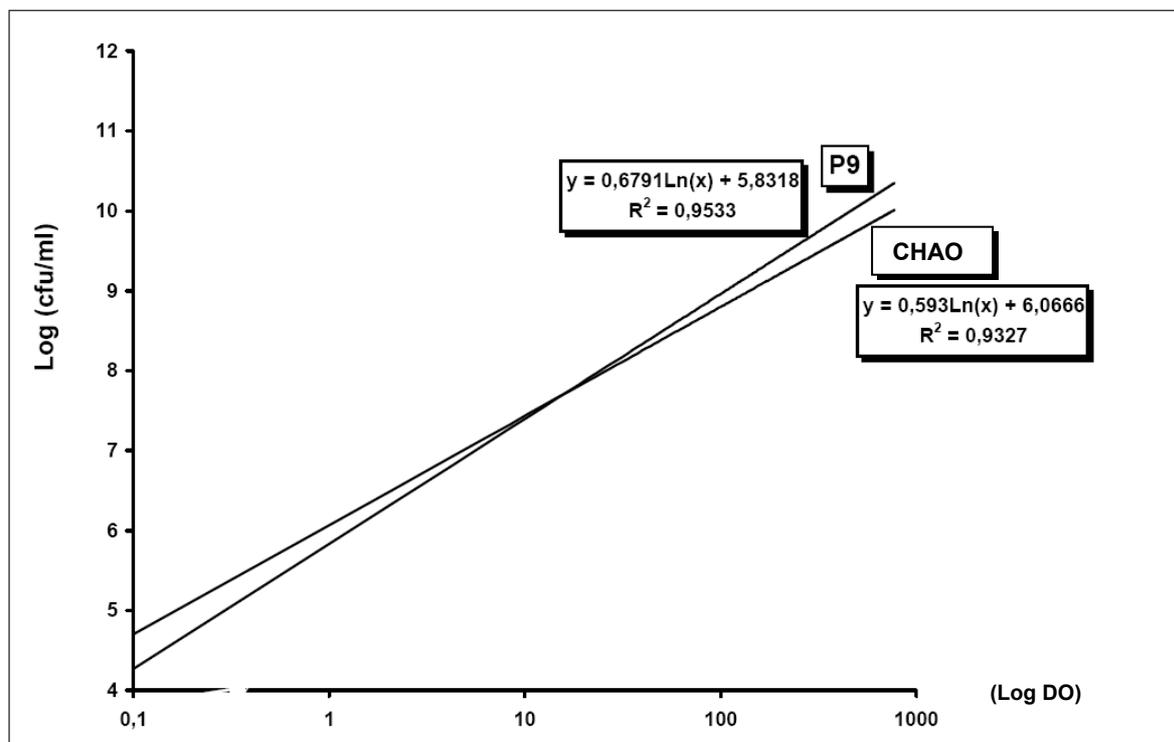
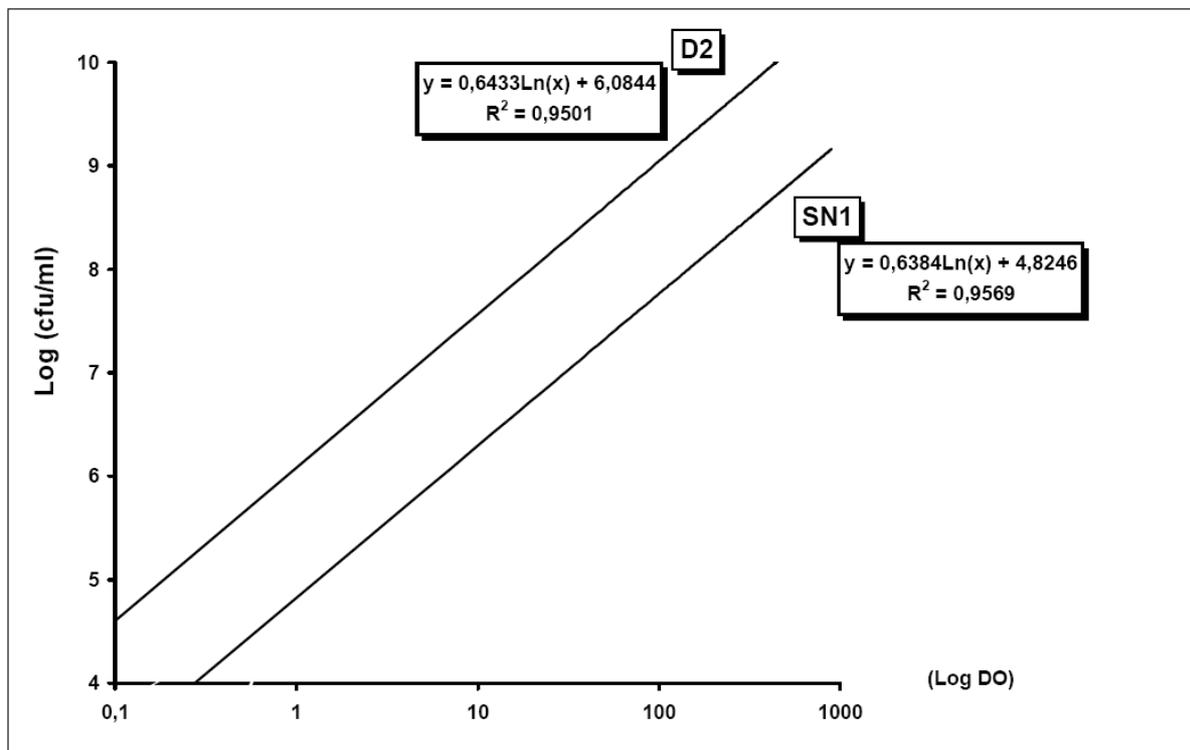
Masse nette : 17.5 kg

Code activité 516 N

La composition : ce terreau pour semis et bouture Vam est composé de tourbe noire, de tourbe blonde de sable et de carbonate de calcium. Afin d'éviter la destruction des racines des jeunes plants en les plaçant séparément ce mélange de terreau est en particulier tamisé. Comme engraissement supplémentaire on a additionné d'engrais organiques avec des oligoéléments pour une meilleure formation radriculaire des plants.

## APPENDICE G

## Courbes étalons des souches bactériennes



## APPENDICE H

## Nature chimique des produits phytosanitaires

Le PROPINEBE : rémanence 8 jours, c'est un polymère de propylène 10 ; C<sub>5</sub> H<sub>8</sub> N<sub>2</sub> S<sub>4</sub> Zn

Le MANEBE : rémanence 7 jours, c'est un N-Ethylène 10 ; C<sub>4</sub> H<sub>6</sub> Mn S<sub>4</sub> N<sub>2</sub>

Ces deux produits phytosanitaires sont des Dithio carbamates (INDEX phytosanitaire 1996).

## APPENDICE I

## Mode opératoire du dosage des éléments minéraux

**Phosphore assimilable, Méthode OLSEN :**

## Extraction :

Peser 5 g de sol tamisé, les placer dans une fiole de 250 ml avec 100 ml de la solution  $\text{NaHCO}_3$ , ajouter 2 à 3 g de charbon actif, agiter pendant 30 minutes sur agitateur (va et vient). Filtrer toute la suspension sur papier filtre.

## Colorimétrie :

Dans une fiole de 25 ml, mettre dans l'ordre :

- 5 ml d'extrait de sol ;
- 3 ml de réactif chlorosulfomolybdique, laisser le  $\text{CO}_2$  se dégager ;
- 15 ml d'eau distillée et homogénéiser ;
- 2 ml de la solution d'acide ascorbique et homogénéiser.

Maintenir les fioles au bain marie à  $80^\circ\text{C}$  durant 5 minutes, refroidir et homogénéiser, colorimètre à 650 nm et noter la lecture sur l'appareil.

## Etablissement de la gamme étalon :

Une gamme étalon de six fioles est préparée dont les concentrations sont 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.0, 1.5 ppm. Ces fioles contiennent à des concentrations différentes :

- une solution de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  à 25 ppm
- solution de bicarbonate
- réactif Chlorosulfomolybdique
- eau distillée
- acide ascorbique

Homogénéiser les solutions puis maintenir en bain marie à  $80^\circ\text{C}$  durant cinq minutes, refroidir et colorimétrer à 650 nm. Noter la lecture sur le colorimètre (spectrophotomètre) pour chaque concentration et tirer une courbe étalon.

## Calcul :

La concentration de l'échantillon de sol  $\text{P}_2\text{O}_5$  (ppm) est

$$X = U/v \cdot V/P$$

X : concentration lue sur le graphique en ppm de  $\text{P}_2\text{O}_5$

U : volume colorimétré (25 ml)

v : volume de la prise d'essai (5 ml)

V : volume de la solution d'extraction (100 ml)

P : poids de la prise d'essai (5 g)

## APPENDICE I (suite)

**Potassium échangeable, Méthode METSON :**

Peser 5 g de sol séché à l'air et tamisé à 2 mm, les placer dans un flacon à agitation ;

- ajouter 50 ml d'HCl (2N) ;
- agiter pendant 2 heures ;
- filtrer avec filtre sans cendres ;
- conserver l'extrait obtenu.

A partir de la solution à 1000 ppm de K, des solutions étalon de 0 à 50 ppm de K sont préparé dans des fioles de 100 ml.

Les solutions étalons et l'extrait du sol sont présentés au spectrophotomètre, les lectures respectives sont notées.

Une courbe d'étalonnage est tracée, d'où la concentration en K de l'échantillon est tirée.

Enfin la quantité du potassium assimilable est calculée selon la formule suivante :

$$X_{(\text{meq K}/100 \text{ g de sol})} = A/39$$

A : la concentration de l'échantillon déduite de la courbe d'étalonnage (en ppm ou mg K/l).

## APPENDICE J

## Caractéristique de la tourbe utilisée pour la culture de pomme de terre

KLASMANN DEILMANN TS 3, substrat à base de tourbe de sphaigne, moyennement décomposée (date de production 05/05).

Selon leur granulométrie et leur composition, les substrats KLASMANN TS3 (France) sont utilisables pour la production de jeunes plants maraîchers en alvéoles et de plantules ornementales en godets et pots.

Pour notre cas, le substrat utilisé est TS 3 (416), pour le semis en alvéoles à structures 0-5mm.

Composition :

Tourbe blonde de sphaigne

Matière sèche 30 % en masse de produit brut

Matière organique 90 % en masse de produit sec

pH (eau) 6.0

Conductivité 30 mS/m

Capacité de rétention pour l'eau : 75%

Engrais NF U 42-100 NPK 14-16-18 en kg/m<sup>2</sup>. Engrais enrobé 1.

Masse en kg 10

Volume en litres 70

## APPENDICE K

Evolution du taux de germination des graines de tomate des deux variétés

Date du suivi Traitements		03.12.05	05.12.05	06.12.05	10.12.05	12.12.05	14.12.05	24.12.05	03.01.06
		05 jours*	07 jours	08 jours	12 jours	14 jours	16 jours	26 jours	36 jours
V1 Nedjma	Témoin	0.00	68.05	83.33	91.66	91.66	95.13	95.13	95.83
	CHAO	0.00	55.10	81.12	87.24	89.28	89.28	91.83	95.91
	C7R12	0.00	70.4	83.67	87.75	87.75	89.79	91.32	91.83
	P64	0.00	67.34	81.63	84.18	84.18	84.18	84.69	84.69
	S20	0.00	57.14	63.77	73.97	76.02	76.02	79.08	82.14
	CK4	0.00	31.63	54.08	80.10	80.10	81.63	82.65	83.67
V2 Agora	Témoin	0.00	20.83	51.38	82.63	84.72	84.72	84.72	85.41
	CHAO	0.00	19.38	56.12	88.77	91.83	92.34	92.34	92.34
	C7R12	0.00	18.36	47.95	83.16	86.83	86.22	88.26	88.77
	P64	0.00	38.77	53.57	89.28	91.83	93.36	93.36	94.38
	S20	0.00	17.34	33.67	58.16	60.71	66.32	82.14	85.2
	CK4	0.00	8.16	34.18	66.63	77.04	76.53	86.73	86.73

\* le nombre de jours après le semis

## Appendice L

Gains (%) en levée chez la culture de tomate

Traitements \ Jours		Jours						
		07 jours*	08 jours	12 jours	14 jours	16 jours	26 jours	36 jours
V1 (Nedjma)	CHAO	-	-	-	-	-	-	0,08
	C7R12	03,45	0,40	-	-	-	-	-
	P64	-	-	-	-	-	-	-
	S20	-	-	-	-	-	-	-
	CK4	-	-	-	-	-	-	-
V2 (Agora)	CHAO	-	09,22	07,43	08,39	08,99	08,99	08,11
	C7R12	-	-	0,64	02,49	01,77	04,17	03,93
	P64	86,12	04,26	08,04	08,39	09,25	10,19	10,50
	S20	-	-	-	-	-	-	-
	CK4	-	-	-	-	-	02,37	01,54

\* le nombre de jours après le semis

## APPENDICE M

Gains (%) des différents paramètres étudiés chez la culture de tomate, effet simple des souches bactériennes

Paramètres étudiés	Souches bactériennes				
	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
Hauteur des plantules de tomate (pépinière)	02,93	09,97	-	-	-
Longueur des racines (pépinière)	45,25	33,44	39,22	47,84	38,79
Nombre de feuilles Période 1 30 jours*	-	4,58	10,38	4,10	6,03
Poids frais de la partie aérienne (pépinière)	03,78	09,09	-	09,09	01,51
Poids frais de la partie souterraine (pépinière)	27,90	25,58	13,95	09,30	06,97
Poids sec de la partie souterraine (pépinière)	60,00	40,00	20,00	20,00	-
Poids moyen des fruits Récolte 5	15,51	35,49	25,85	-	-
Poids des fruits par plant Récolte 5	31,43	42,66	27,15	-	-
Poids des fruits par plant Récolte 6	19,10	48,23	14,45	02,35	-
Deuxième dosage des protéines à partir des feuilles	05,09	07,84	12,15	-	-
Dosage des protéines à partir des fruits	5,26	-	-	-	05,26
Taux de phosphore	-	-	11,42	-	-
Taux du potassium	-	-	-	-	02,53

\* Le nombre de jours après la transplantation des plantules au niveau de la serre

## APPENDICE N

Gains (%) des différents paramètres étudiés chez la culture de tomate, effet de l'interaction ; bactérisation et variétés de tomate

Les traitements Les paramètres étudiés	V1 (Nedjma)					V2 (Agora)				
	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
Hauteur des plants Période 1 30 jours*	-	03,50	04,75	03,11	12,03	-	-	-	-	-
Longueur des racines (pépinière)	51,72	48,70	48,27	37,93	60,34	38,79	18,10	30,17	57,24	17,24
Nombre de feuilles Période 1 30 jours*	01,37	14,46	16,33	13,59	20,44	-	-	04,80	-	-
Poids frais de la partie aérienne (pépinière)	02,23	20,89	05,22	13,43	08,20	04,61	-	-	04,61	-
Poids moyen des fruits Récolte 5	19,87	62,20	39,80	-	-	10,70	06,09	10,49	0,85	-
Poids des fruits par plant Récolte 1	-	-	148,8 6	-	-	-	05,30	-	57,35	36,15
Premier dosage des protéines à partir des feuilles	-	-	0,33	-	-	07,01	07,01	03,32	07,38	06,64
Deuxième dosage des protéines à partir des feuilles	-	10,58	02,55	-	-	10,97	03,79	22,78	08,86	12,23
Dosage des protéines à partir des fruits	07,50	-	-	-	15,00	02,70	21,62	-	08,10	-
Taux de phosphore	-	-	27,71	01,57	18,42	-	17,80	02,15	-	-
Taux du potassium	-	-	-	-	02,56	-	-	-	-	03,79

\* Le nombre de jours après la transplantation des plantules au niveau de la serre

## APPENDICE O

Evolution du taux de germination des tubercules de pomme de terre des deux essais ; essais avec fertilisation (E1), essai sans fertilisation (E2)

	Essai 1 (avec fertilisation)						Essai 2 (sans fertilisation)					
	T <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	T <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>
12.01.06 21 jours*	4.16 ± 2.51	8.03 ± 2.96	6.69 ± 1.57	8.48 ± 2.10	5.36 ± 2.04	6.25 ± 1.40	7.58 ± 1.76	11.30 ± 1.28	7.73 ± 1.41	8.92 ± 1.57	9.51 ± 0.77	9.51 ± 0.53
16.01.06 25 jours	60.26 ± 9.68	66.07 ± 6.30	53.57 ± 8.74	56.69 ± 5.71	51.18 ± 5.38	52.37 ± 5.52	48.21 ± 13.80	52.23 ± 8.58	47.61 ± 5.44	59.37 ± 9.69	49.99 ± 2.33	49.55 ± 14.37
22.01.06 31 jours	70.08 ± 9.09	69.64 ± 8.99	65.18 ± 5.07	71.87 ± 3.62	60.71 ± 10.85	59.82 ± 12.55	61.60 ± 13.28	67.48 ± 8.68	65.32 ± 7.92	67.85 ± 10.68	63.39 ± 2.34	64.28 ± 7.14
01.02.06 40 jours	88.39 ± 3.87	81.24 ± 3.12	81.69 ± 0.95	84.82 ± 2.14	78.57 ± 6.52	75.00 ± 5.17	70.98 ± 14.61	78.57 ± 7.95	77.97 ± 8.74	79.46 ± 5.17	76.78 ± 7.13	75.45 ± 7.35
06.02.06 45 jours	92.41 ± 3.29	86.15 ± 2.38	84.37 ± 1.49	87.94 ± 2.32	85.26 ± 4.27	84.87 ± 3.77	75.44 ± 10.47	83.03 ± 9.44	73.12 ± 9.30	83.48 ± 1.79	82.58 ± 7.79	79.46 ± 6.98
13.02.06 52 jours	94.64 ± 1.20	86.15 ± 2.63	85.71 ± 2.77	91.51 ± 1.45	87.05 ± 4.79	87.05 ± 3.93	80.35 ± 8.43	84.37 ± 10.75	79.90 ± 12.09	86.16 ± 3.81	83.93 ± 8.66	80.35 ± 4.71
20.02.06 59 jours	94.64 ± 1.67	87.05 ± 3.04	86.60 ± 1.96	91.96 ± 1.17	86.60 ± 5.28	88.84 ± 4.29	80.35 ± 7.89	84.82 ± 9.52	81.24 ± 10.94	86.16 ± 4.58	86.16 ± 6.63	81.25 ± 3.61

\* le nombre de jours après plantation

T<sub>0</sub> : Témoin S<sub>1</sub> : CHAO S<sub>2</sub> : C7R12 S<sub>3</sub> : P64 S<sub>4</sub> : S20 S<sub>5</sub> : CK4

## APPENDICE P

Gains (%) des différents paramètres étudiés chez la culture de pomme de terre, effet simple des souches bactériennes

Souches bactériennes Paramètres étudiés	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
Taux de levée : Date 1 (21 jours après semis)	09,67	07,21	08,70	07,44	07,88
Poids frais de la partie aérienne	06,34	26,09	06,87	18,48	0,16
Dosage des protéines à partir des feuilles	10,20	-	-	03,06	-
Dosage des protéines à partir du tubercule	-	-	-	12,50	-
Dosage du phosphore	16,40	20,00	05,62	-	03,60
Dosage du potassium	01,51	03,03	-	16,66	16,66

## APPENDICE Q

Gains (%) des différents paramètres étudiés chez la culture de pomme de terre, effet de l'interaction bactérisation et fertilisation minérale

Traitements Paramètres étudiés	Essai 1 (avec fertilisation)					Essai 2 (sans fertilisation)				
	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4	CHAO	C7R12	P64	S20	CK4
Diamètre des tiges	05,08	15,25	13,55	16,94	01,69	-	-	-	-	-
Poids frais de la partie aérienne	03,65	44,45	06,92	16,42	08,73	09,87	01,78	06,82	21,17	-
Dosage des protéines à partir des feuilles	15,93	07,45	02,03	05,42	-	04,45	-	-	01,02	-
Dosage des protéines à partir du tubercule	-	-	-	10	-	50,00	16,66	-	16,66	16,66

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Davet, P., « Vie Microbienne du sol et production végétale », INRA, Paris, France, 1996, pp.383.
2. Hilliard, C. et Reedyk, S., « Les meilleures pratiques des gestions agricoles », Agriculture and agri-Food Canada, Water quality Unit, n° 97, 2000, pp.4.
3. Bourdais, J.L., « L'agrobiologie respecte-t-elle l'environnement ? », Cemagref – Info Médias, n° 46, 2001.
4. Becard, G. et Journet, E.P., « L'agriculture peut-elle utiliser moins d'engrais » Symbioses racinaires, INRA, France, 2006.
5. Moricourt, G., « Agriculture et santé ; l'impact des pratiques agricoles sur la qualité de vos aliments », Dangles, France, 2006, pp.320, [http://www.notre-planete.info/actualites/actu\\_1176](http://www.notre-planete.info/actualites/actu_1176)
6. Magunr., « Usages industriels non alimentaires des produits agricoles au Canada ; système de gestion des marchés stratégiques biopesticides », Agriculture et Agroalimentaire Canada AAC, 2002.
7. Van Diepeningen, A.D., De Vos, O.J., Korthals, G.W. and Van Bruggen, A.H.C., « Effects of organic versus conventional management on chemical and biological parameters in agricultural soils », Applied Soil Ecology, 2005, pp.1 - 16.
8. « Bio et Environnement », Objectif Bio, 2007, <http://www.objectifbio.org>
9. Boiteau, G., Lynch, D., Berthéléme, C. and Beavers, R., « Évaluation de solutions en matière de lutte contre le doryphore et de fertilisation azotée en production de pommes de terre biologiques », Réseau du savoir biologique, Centre d'agriculture biologique du Canada OACC, Rapport de recherche final, n° 10, 2007, pp.4.
10. Benhamou, N. et Picard, K., « La résistance induite : une nouvelle stratégie de défense des plantes contre les agents pathogènes », Phytoprotection, n° 80, 2000, pp.137 - 168.
11. Drouin, J., « Pleins feux sur la recherche 2001–2002 », Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), Direction générale de la recherche, 2002, [www.agr.gc.ca/science/research-recherche/ann-dir/](http://www.agr.gc.ca/science/research-recherche/ann-dir/)
12. Duval, J., Grenier, S., La France, D., Legault, C., Raby, L., Ricquart, M., Scholz, M. and Dubé, S., « Guide de transition en agriculture biologique », la Fédération d'agriculture biologique du Québec (FABQ), Agro Expert Inc, Québec, Canada, 2003, pp.43. [www.fababio.ca](http://www.fababio.ca)

13. Spadaro, D., Gullino, M.L., « Improving the efficacy of biocontrol agents against soilborne pathogens », *Crop Protection*, 2005, pp.1 - 13.
14. Oueslati, H.B.A., Amor, Y. and Kilcher, L., « Conversion à l'agriculture biologique Défis pour le futur », *Agriculture biologique ; Version Tunisie*, n° 1, Edition ; Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques de la Tunisie (DGPA), Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) et l'Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL), 2006, pp.12.
15. Vessey, J.K., « Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers », *Plant and Soil*, n° 255, 2003, pp.571- 586.
16. Park, M., Kim, C., Yang, J., Lee, H., Shin, W., Kim, S. and Sa, T., « Isolation and characterization of diazotrophic growth promoting bacteria from rhizosphere of agricultural crops of Korea », *Microbiological Research*, n° 160, 2005, pp.127 - 133.
17. Barea, J.M., « Des champignons agissant comme biofertilisants », *Adit Espagne, Midi Pyrenees Innovation*, n° 840, 2006, [http://www.rrrt.cict.fr/news/index.php?id\\_news=840](http://www.rrrt.cict.fr/news/index.php?id_news=840)
18. Vieweger, A., « fertilité du sol : favoriser les champignons mycorhiziens avec le compost et l'engrais vert », *Le sol et les plantes, Rapport d'activité de L'institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL)*, 2006, pp.15.
19. Sapolin, S., « Un nouveau mécanisme symbiotique plante -bactérie prometteur pour l'agronomie », *Actualité scientifique, Institut de recherche pour le développement (IRD)*, Fiche n° 269, 2007, [www.ird.fr](http://www.ird.fr).
20. Sheng, X.F., « Growth promotion and increased potassium uptake of cotton and rape by a potassium releasing strain of *Bacillus edaphicus* », *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, pp.1 - 5.
21. Kennedy, I., Kecskés, M., Deaker, R., Roughley, R., Rose, M., Choudhury. A., Pereg-Gerk, L., Marsh, S., Nguyen, H., Phan, C., Pham, T. and Tran, B., « Plant growth promoting diazotrophs : optimising their role for maximimizing sustainable yields of field crops », *Congrès international, RHIZOSPHERE 2*, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
22. Lemanceau, P., « Effets bénéfiques de rhizobactéries sur plantes : exemple des *Pseudomonas* spp fluorescents », *Agronomie*, n°12, 1992, pp.413 - 437.
23. Latour, X., Delorme, S., Mirleau, P. and Lemanceau, P., « Identification of traits implicated in the rhizosphere competence of fluorescent *Pseudomonads* : description of startegy based on population and model strain studies », *Agronomie*, n° 23, 2003, pp.397- 405.

24. Buddrus, K., Schmid, M. and Hartmann, A., « Application and plant growth promoting effect of a commercially used biological plant stimulator in barley », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
25. Venturi, V., Bertani, I., Bigirimana, J., Cabrio, L., Degrassi, G., DeSordi, L., Devescovi, G., Mattiuzzo, M., Ferluga, S., Steindler, L., Rocio Suarez Moreno, Z. and Subramoni, S., « Bacterial intercellular communication (quorum sensing) in rice associated bacteria », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
26. Sharmaa, A., Johria, B.N., Sharmab, A.K. and Glickc, B.R., « Plant growth-promoting bacterium *Pseudomonas* sp. strain GRP3 influences iron acquisition in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilzeck) », *Soil Biology and Biochemistry*, n° 35, 2003, pp.887 - 894.
27. Ryu, C.M., Farag, M.A., Hu, C.H., Reddy, M.S., Wei, H.X., Pare, P.W. and Kloepper, J.W., « Bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis* », *PNAS*, V. 100, n° 8, 2003, pp.4929.
28. Zahir, Z.A., Arshad, M. and Frankenberger, W.T., « Plant Growth Promoting Rhizobacteria : Applications and Perspectives in Agriculture », *Advances in Agronomy*, vol. 81, 2003, pp. 97 - 168.
29. Nechadi, S., Benddine, F., Moumen, A. and Kheddami, M., « Etat des maladies virales de la tomate et stratégie de lutte en Algérie », *EPPO Bulletin*, vol. 32, n° 1, 2002, pp.21.
30. Organisation des Nations Unies pour L'alimentation et L'agriculture (FAO), « Utilisation des engrais par culture en Algérie », Service de la gestion des terres et de la nutrition des plantes, Division de la mise en valeur des terres et des eaux, Rome, 2005, [www.fao.orghttp://www.fao.org/docrep/008/y5953f/y5953f00.htm#Contents](http://www.fao.org/docrep/008/y5953f/y5953f00.htm#Contents)
31. Moëne-Loccoz, Y., « Ecologie microbienne, Interactions Rhizosphériques », présentation de l'équipe rhizosphère n°3, 2003, <http://ecomicro.univ-lyon1.fr/rhizo/presentation.php>
32. Costa Carvalhais, L., Fedoseyenko, D., Chen, X.H., Borriss, R., Vanderleyden, J., Neumann, G. and Von Wirén, N., « Effect of root exudates on the expression of plant-growth promoting genes in rhizobacteria », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
33. Gagné, S., Dehbi, L., Le Quéré, D., Cayer, F., Morin, J.L., Lemay, R. and Fournier, N., « Increase of greenhouse tomato fruit yields by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) inoculated into the peat-based growing media », *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 25, n° 2, 1993, pp.269 - 272.

34. Latour, X., Corberand, T., Laguerre, G. and Allard, F., « The composition of fluorescent *Pseudomonad* populations associated with roots is influenced by plant and soil type », *Applied and environmental Microbiology*, vol. 62, n° 7, 1996, pp.2449 - 2456.
35. Sindhu, S.S., Suneja, S., Goel, A.K., Parmar, N. and Dadarwal, K.R., « Plant growth promoting effects of *Pseudomonas sp.* on coinoculation with *Mesorhizobium sp. Cicer* strain under sterile and "wilt sick" soil conditions », *Applied Soil Ecology*, n° 19, 2002, pp. 57- 64.
36. Chain, F. et Benizri, E., « Influence de l'inoculation d'une bactérie PGPR sur la structure phénotypique et génétique des communautés bactériennes indigènes de la rhizosphère du maïs », UMR Agronomie et Environnement, France, 2004, <http://www.ensaia.inpl-nancy.fr/lae/Menu/Biblio/Articles%20labo.htm>
37. Touraine, B., « Identification des bases moléculaires de la réponse du développement racinaire d'*Arabidopsis sp* à des bactéries PGPR », Fiche de présentation de la thèse, Laboratoire Symbioses tropicales et méditerranéennes, 2004.
38. Benchabane, M., « Caractérisation des effets d'antagonisme microbien et de promotion de la croissance végétale de souches de *Pseudomonas spp.* Fluorescents », Thèse Doctorat d'état, FSB-UTHB, Alger, Algérie, 2005, pp.235.
39. Gilles, C., Moëgne-Loccoz, Y. and Bertrand, C., « Mise au point d'une méthode globale d'analyse du métabolome végétal pour caractériser l'effet des bactéries PGPR sur la plante », UMR Ecologie microbienne, Lyon, France, 2005.
40. Guerineau, C., « Biotisation des plants de fraisiers », rapport final, production et protection des plants et semences en agriculture biologique (Dossier n°02/22-AB : Plants et semences AB), 2005.
41. Carmen, M., Carmen, S., Marta, A., Antonio, D. and Maria, C., "Rooting induction of olive plants cuttings by plant growth promoting rhizobacteria", Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
42. Mijajlovic, G., Deaker, D.R. and Kennedy, I. R., « Methods for the isolation and quantification of beneficial bacteria in the rhizosphere of crop plants », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
43. Oswald, A., Calvo, P. and Zuniga, D., « Plant growth promoting rhizobacteria to improve productivity and plant health of potato based cropping systems in the Central Andean Highlands », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>

44. Grayston, S.J., Stephens, J.H. and Nelson, L.M., « Field and greenhouse studies on growth promotion of spring wheat inoculated with co- existent rhizobacteria », pp.11 - 16, in « Plant growth promoting rhizobacteria, Progress and prospects », Keel, C., Koller, B. and Défago, G., International Union of Biological Sciences, International organisation for biological and integrated control of noxious animals and plants, WPRS Bulletin, Switzerland, 1991, pp.418.
45. Hassanzadeh, N., « Role of rhizobacteria in promoting cowpea seed growth », pp.98, in « Plant growth promoting rhizobacteria, Progress and prospects », Keel, C., Koller, B. and Défago, G., International Union of Biological Sciences, International organisation for biological and integrated control of noxious animals and plants, WPRS Bulletin, Switzerland, 1991, pp.418.
46. Vial, L., « Adaptation de la bactérie PGPR *Azospirillum lipoferum* à la rhizosphère des Graminées : rôle du phénomène de Quorum sensing et de la variation de phase », Thèses d'état, École Doctorale ; Écosystèmes Évolution Modélisation Microbiologie, Université Claude Bernard, Lyon, France, 2004.
47. Sturz, A.V. et Christie, B.R., « Beneficial microbial allelopathies in the root zone: the management of soil quality and plant disease with rhizobacteria », *Soil and Tillage Research*, n° 72, 2003, pp.107 - 123
48. Cohen, M.F., Yamasaki, H. and Mazzola, M., « *Brassica napus* seed meal soil amendment modifies microbial community structure, nitric oxide production and incidence of Rhizoctonia root rot », *Soil Biology and Biochemistry*, n° 37, 2005, pp.1215 - 1227.
49. Nicklin, J., Graeme-Cook, K., Paget, T. and Killington, R., « L'essentiel de la microbiologie », Port Royal Livres, Berti Editions, Paris, France, 2000, pp.360.
50. Bertrand, H., Poly, F., Tran Van, V., Lombard, N., Nalin, R., Vogel, T.M. and Simonet, P., « High molecular weight DNA recovery from soils prerequisite for biotechnological metagenomic library construction », *Journal of Microbiological Methods*, n° 62, 2005, pp.1 - 11.
51. Berggren, I., Alström, S. and Mårtensson, A.M., « Deleterious properties of certain rhizosphere bacteria on field pea (*Pisum sativum*) under gnotobiotic and non-sterile conditions », *Applied Soil Ecology*, n° 16, 2001, pp.169 - 177
52. Gamalero, E., Lingua, G., Berta, G. and Lemanceau, P., « Methods for studying root colonisation by intruded beneficial bacteria », *Agronomie*, n° 23, 2003, pp.407 - 418.
53. Pühler, A., Arlat, M., Becker, A., Göttfert, M., Morrissey, J.P. and O'Gara, F., « What can bacterial genome research teach us about bacteria-plant interactions ? », *Current Opinion in Plant Biology*, n° 7, 2004, pp.137 - 147.

54. O’Gara, F., « Développements Actuels en Agriculture Raisonnée ; Utilisation d'inoculants microbiens : Bénéfiques pour l'agriculture raisonnée », Bulletin technique n°. 1, ECO-SAFE Consortium, Projet “ Ecological and environmental biosafety assessment of novel plant and microbiology biotechnology product” fondé par la Commission Européenne dans le 5ème programme cadre (QLK3-2000-01759), 2002, <http://www.ucc.ie/biomerit/ecosafe.htm>
55. Okon, Y., « PGPR-technology cases of application and future prospects », Congrès international, RHIZOSPHERE Perspectives and challenge; A tribute to Lorenz Hiltner, Munich, Germany, 2004, <http://www.gsf.de/iboe/congress>
56. Prigent-Combaret, C. et Moëgne-Loccoz, Y., « Analyse des interactions entre bactéries phytobénéfiques (PGPR) au sein du biofilm rhizosphérique », Proposition sujet Thèse, UMR, Ecologie microbienne, France, 2005.
57. Kloepper, J.W., Scher, F.M., Laliberte, M. and Tipping, B., « Emergence promoting rhizobacteria : description and implication for agriculture », pp.155 – 164, in « Iron, siderophores and plant diseases », Life Science, TR Swinburne Edition, NATO ASI series A, , Plenum press, New York, USA, 1986, pp. 351.
58. Bloemberg, G.V. et Lugtenberg, B.J.J., « Molecular basis of plant growth promotion and biocontrol by rhizobacteria », Current Opinion in Plant Biology, n°4, 2001, pp.343 - 350.
59. Humphris, S.N., Bengough, A.G., Griffiths, B.S., Kilham, K., Rodger, S., Stubbs, V., Valentine, T.A. and Young, L.M., «Root cap influences root colonisation by *Pseudomonas fluorescens* SBW25 on maize », FEMS Microbiology Ecology, 2005, pp.1 - 8.
60. Gray, E.J. et Smith, D.L., « Intracellular and extracellular PGPR: commonalities and distinctions in the plant–bacterium signaling processes », Soil Biology and Biochemistry, n° 37, 2005, pp.395 - 412.
61. Di Battista-Leboeuf, C., Benizri, E., Corbel, G., Piutti, S. and Guckert, A., « Distribution of *Pseudomonas* sp. In relation to maize root location and growth stage », Agronomie, n° 23, 2003, pp.441 - 446.
62. Bradley, R., « la rhizosphère », Cours n° 6, 2005.
63. Prithviraj, B., Zhou, X., Souleimanov, A., Kahn, W. and Smith, D.L., « A host-specific bacteria-to-plant signal molecule (Nod factor) enhances germination and early growth of diverse crop plants », Planta, n° 216, 2003, pp.437 - 445.
64. Alström, S., « Deleterious rhizobacteria in relation to plants and other microorganisms », pp.275 – 285, in « Plant growth promoting rhizobacteria, Progress and prospects », Keel, C., Koller, B. and Défago, G., International Union of Biological Sciences, International organisation for biological and integrated control of noxious animals and plants, WPRS Bulletin, Switzerland, 1991, pp.418.

65. Jossi, M., Hamelin, J., Tarnawski, S., Aragno, M. and Fromin, N., « Structure and diversity of total and active rhizospheric Bacterial communities associated with different cultivars of *Lolium perenne* », Congrès international, RHIZOSPHERE Perspectives and challenge; A tribute to Lorenz Hiltner, Munich, Germany, 2004, <http://www.gsf.de/iboe/congress>
66. Vieira, F.C.S. et Nahas, E., « Comparison of microbial numbers in soils by using various culture media and temperatures », Microbiological Research, n° 160, 2005, pp.197 - 202.
67. Väisänen, R.K., Roberts, M.S., Garland, J.L., Frey, S.D. and Dawson, L.A., « Physiological and molecular characterisation of microbial communities associated with different water-stable aggregate size classes », Soil Biology and Biochemistry, 2005, pp.1 - 10.
68. Beauchamp, C. J., Kloepper, J. W., Chalifour, F. P. and Antoun, H., « Effects of temperature on growth promotion and root colonization of potato by bioluminescent rhizobacteria mutants », pp.332 – 335, in « Plant growth promoting rhizobacteria, Progress and prospects », Keel, C., Koller, B. and Défago, G., International Union of Biological Sciences, International organisation for biological and integrated control of noxious animals and plants, WPRS Bulletin, Switzerland, 1991, pp.418.
69. Schloter, M., Lebuhn, M., Heulin, T. and Hartmann, A., « Ecology and evolution of bacterial microdiversity », FEMS Microbiology Reviews, n° 24, 2000, pp.647 - 660.
70. Piutti, S., Caquet, B., Slezack-Deschaumes, S. and Nguyen, C. « Evolution of the bacterial soil community (density, activity and structure) in maize rhizosphere during phenology », Congrès international, RHIZOSPHERE Perspectives and challenge; A tribute to Lorenz Hiltner, Munich, Germany, 2004, <http://www.gsf.de/iboe/congress>
71. Grayston, S.J. et Prescott, S.E., « Microbial communities in forest floors under four tree species in coastal British Columbia », Soil Biology and Biochemistry, n° 37, 2005, pp.1157–1167.
72. Tiquia, S.M., Lloyd, J., Herms, D.A., Hoitink, H.A.J. and Michel, F.C., « Effects of mulching and fertilization on soil nutrients, microbial activity and rhizosphere bacterial community structure determined by analysis of TRFLPs of PCR - amplified 16S rRNA genes », Applied Soil Ecology, n° 21, 2002, pp.31 - 48.
73. Babana, A.H., « Mise au point d'un inoculant biologique pour le blé irrigué du MALI », Thèse (grade ; Philosophiae Doctor), Université Laval, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation (Sols et génie agroalimentaire), Québec, Canada, 2003, pp.138.
74. Bittman, S., Forge, T.A. and Kowalenko, C.G., « Responses of the bacterial and fungal biomass in a grassland soil to multi-year applications of dairy manure slurry and fertilizer », Soil Biology and Biochemistry, n° 37, 2005, pp.613 - 623.

75. Böhme, L., Langer, U. and Böhme, F., « Microbial biomass, enzyme activities and microbial community structure in two European long-term field experiments Agriculture », *Ecosystems and Environment*, 2005, pp.1 - 12.
76. Pietikäinen, J., Pettersson, M. and Baath, E., « Comparison of temperature effects on soil respiration and bacterial and fungal growth rates », *FEMS Microbiology Ecology*, n°52, 2005, pp.49 - 58.
77. Benizri, E. et Amiaud, B., « Relationship between plant and soil microbial communities in Fertilized grasslands », Congrès international, RHIZOSPHERE Perspectives and challenge; A tribute to Lorenz Hiltner, Munich, Germany, 2004, <http://www.gsf.de/iboe/congress>
78. Zhang, F., Shen, J. and Li, L., « Rhizosphere management for improving crop yield and nutrient use efficiency in china », Congrès international, RHIZOSPHERE Perspectives and challenge; A tribute to Lorenz Hiltner, Munich, Germany, 2004, <http://www.gsf.de/iboe/congress>
79. Ginovart, M., López, D. and Gras, A., « Individual-based modelling of microbial activity to study mineralization of C and N and nitrification process in soil », *Nonlinear Analysis: RealWorld Applications*, n°6, 2005, pp.773 - 795.
80. Kinney, C.A., Mandernack, K.W. and Mosier, A.R., « Laboratory investigations into the effects of the pesticides mancozeb, chlorothalonil, and prosulfuron on nitrous oxide and nitric oxide production in fertilized soil », *Soil Biology and Biochemistry*, n° 37, 2005, pp.837 - 850.
81. Fromin, N., Achouak, W., Thiéry, J.M. and Heulin, T., « The genotypic diversity of *Pseudomonas brassicacearum* populations isolated from roots of *Arabidopsis thaliana*: influence of plant genotype », *FEMS Microbiology Ecology*, n° 37, 2001, pp.21 - 29.
82. Jacques, P., Delfosse, P., Ongena, M., Lepoivre, P., Cornélis, P., Koedam, N., Neirinckx, L. and Thonart, P., « Les mécanismes biochimiques développés par les *Pseudomonas* fluorescents dans la lutte biologique contre les maladies des plantes transmises par le sol », *Cahiers Agricultures*, n°2, (1993), pp. 301 - 307.
83. Gobat, J.M., Aragno, M. and Matthey, W., « Le sol vivant ; Bases de pédologie, Biologie des sols », Edition 2, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, France, 2003, pp.568.
84. Walker, T.S., Bais, H.P., Grotewold, E. and Vivanco, J.M., « Root exudation and rhizosphere biology », *Plant physiology*, vol. 132, 2003, pp.44 - 51.
85. Lynch, J.M., « Microbial Rhizosphere Competence », Congrès international, RHIZOSPHERE Perspectives and challenge ; A tribute to Lorenz Hiltner, Munich, Germany, 2004, <http://www.gsf.de/iboe/congress>

86. Bais, H.P., Park, S.W., Weir, T.L., Callaway, R.M. and Vivanco, J.M., « How plants communicate using the underground information Superhighway », Trends in Plant Science, vol. 9, n°1, 2004, pp.26 - 32.
87. Roemheld, V., « The Rhizosphere: Definition And Perspectives », Congrès international, RHIZOSPHERE Perspectives and challenge; A tribute to Lorenz Hiltner, Munich, Germany, 2004, <http://www.gsf.de/iboe/congress>
88. Rosas. S., « *Pseudomonas aurantiaca*: its role in the rhizosphere of important agronomic cultivars », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
89. Roussel-Delif, L., Vestergård, M., Fromin, N., Aragno, M. and Ekelund F., « Soil microorganisms associated with barley (*hordeum vulgare*) responded only slightly to a simulated herbivore attack », Congrès international, RHIZOSPHERE Perspectives and challenge ; A tribute to Lorenz Hiltner, Munich, Germany, 2004, <http://www.gsf.de/iboe/congress>
90. Lin, Q., Chen, Y.X., He, Y.F. and Tian, G.M., « Root-induced changes of lead availability in the rhizosphere of *Oryza sativa* L. », Agriculture. Ecosystems and Environment, n°104, 2004, pp.605 - 613.
91. Parke, J.L., « Root colonization by introduced bacteria », pp.293 – 298, in « Plant growth promoting rhizobacteria, Progress and prospects », Keel, C., Koller, B. and Défago, G., International Union of Biological Sciences, International organisation for biological and integrated control of noxious animals and plants, WPRS Bulletin, Switzerland, 1991, pp.418.
92. De Weger, L.A., Dekkers, L.C. and Lugtenberg, B.J.J., « Use of reporter bacteria for studying the availability of phosphate in the rhizosphere and in soil », pp.223 – 226, in « Plant growth promoting rhizobacteria, Progress and prospects », Keel, C., Koller, B. and Défago, G., International Union of Biological Sciences, International organisation for biological and integrated control of noxious animals and plants, WPRS Bulletin, Switzerland, 1991, pp.418.
93. De Freitas, J.R. et Germida, J.J., « Growth promotion of winter wheat by *fluorescent pseudomonads* under field conditions », Soil Biology and Biochemistry, vol. 24, n° 11, 1992, pp.1137-1146.
94. Loh, J., Pierson, E.A., Pierson, L.S., Stacey, G. and Chatterjee, A., « Quorum sensing in plant-associated bacteria », Current Opinion in Plant Biology, 2002, pp.5.
95. D'Angelo-Picard, C., Faure, D., Carlier, A., Uroz, S., Raffoux, A., Fray, R. and Dessaux, Y., « Bacterial populations in the rhizosphere of tobacco plants producing the quorum-sensing signals hexanoyl-homoserine lactone and 3-oxo-hexanoyl-homoserine lactone », FEMS Microbiology Ecology, n° 51, 2004, pp.19 - 29.

96. Bauer, W.D. et Mathesius, U., « Plant responses to bacterial quorum sensing signals », *Current Opinion in Plant Biology*, n°7, 2004, pp.429 - 433.
97. Jennifer, M., Henke, J.M. and Bassler, B.L., « Bacterial social engagements », *Trends in Cell Biology*, vol. 14, n° 11, 2004, pp. 648 - 656.
98. Bassler, B.L., « Small Talk : Cell-to-Cell ; Communication in Bacteria Cell », *Cell Press*, vol. 109, 2002, pp.421- 424.
99. Tracey, M.T.W. et Bailey, M.J., « Reliable use of green fluorescent protein in *fluorescent pseudomonads* », *Journal of Microbiological Methods*, n° 46, 2001, pp.77- 80.
100. Dawson, S.L., Fry, J.C. and Dancer, B.N., « A comparative evaluation of five typing techniques for determining the diversity of *fluorescent pseudomonads* », *Journal of Microbiological Methods*, n° 50, 2002, pp.9 - 22.
101. Todar, K., « *Pseudomonas* and Related Bacteria », University of Wisconsin-Madison, Department of Bacteriology, USA, 2004, <http://www.textbookofbacteriology.net/>
102. Euzéby, J.P.M., « Dictionnaire de bactériologie vétérinaire », École Nationale Vétérinaire, Toulouse, France, 2005, <http://www.bacterio.cict.fr/baccico/pp/pseudomonadales.html>.
103. Lloyd-Jones, G., Laurie, A.D. and Tizzard, A.C., « Quantification of the *Pseudomonas* population in New Zealand soils by fluorogenic PCR assay and culturing techniques », *Journal of Microbiological Methods*, n° 60, 2005, pp.217 - 224.
104. Decoster, A., Lemahieu, J.C., Dehecq, E. and Duhamel, M., « *Pseudomonas*, microbiologie », 2006, <http://anne.decoster.free.fr/baccueil.html>, <http://www.microbes-edu.org>
105. Benchabane, M., Toua, D. and Bakour, R., « Taxonomic diversity and distribution of *fluorescent Pseudomonads* of various crop plants rhizosphere in Algeria », Congrès international, RHIZOSPHERE Perspectives and challenge ; A tribute to Lorenz Hiltner, Munich, Germany, 2004, <http://www.qsf.de/iboe/congress>
106. Katiyar, V. et Goel, R., « Solubilization of inorganic phosphate and plant growth promotion by cold tolerant mutants of *Pseudomonas fluorescens* », *Microbiol. Res*, n°158, 2003, pp.163 - 168.
107. Sarniguet, A., « Mécanismes d'acquisition de résistance des sols aux maladies des plantes », in Chapon, A., « Etude de la spécificité de colonisation racinaire du blé par *Pseudomonas fluorescens* Pf29A, antagoniste de *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*, l'agent du piétin-échaudage », Thèse d'état, Université Rennes, France, 2000, pp.105.

108. Bashan, Y. et De-Bashan, L.E., « Fresh-weight measurements of roots provide inaccurate estimates of the effects of plant growth-promoting bacteria on root growth: a critical examination », *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, pp.1 - 10
109. Gravel, V., Martinez, C., Antoun, H. and Tweddell, R.J., « Sélection de micro-organismes antagonistes contre *Pythium aphanidermatum* et *Pythium ultimum*, champignons responsables de la fonte des semis chez la tomate de serre », Résumés des communications, Société de protection des plantes du Québec 95<sup>e</sup> Assemblée annuelle, *phytoprotection*, vol. 84, n° 3, 2003, pp.167 - 179.
110. Fernando, W.G.D., Ramarathnam, R., Krishnamoorthy, A.S. and Savchuk, S.C., « Identification and use of potential bacterial organic antifungal volatiles in biocontrol », *Soil Biology and Biochemistry*, n° 37, 2005, pp.955 - 964.
111. Ramamoorthy, V., Viswanathan, R., Raguchander, T., Prakasam, V. and Samiyappan, R., « Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria in crop plants against pests and diseases », *Crop Protection* n° 20, 2001, pp.1 - 11.
112. Ahonsi, M.O., Berner, D.K., Emechebe, A.M., Sanginga, N. and Lagoke, S.T., « Selection of non-pathogenic ethylene-producing rhizobacteria for accelerated depletion of *striga hermonthica* seed bank », *African Crop Science Journal*, vol. 10, n° 2, 2002, pp.145 - 156.
113. Allaire, M., Bernier, L. and Hamelin, R.C., « Diversité fonctionnelle des bactéries productrices d'antibiotiques dans les rhizosphères de conifères », Résumé des communications, Société de protection des plantes du Québec, 95<sup>e</sup> Assemblée annuelle, *Phytoprotection*, vol. 84, n°3, 2003, pp.167 - 179.
114. Hiifte, M., Vande Woestyne, M. and Verstraete, W., « Role of siderophores in plant growth promotion and plant protection by *fluorescent pseudomonads* » *Biochemistry of Metal Micronutrients in the Rhizosphere*, J.A, Manthey., D.E, Crowley. and D.G, Luster, USA, 1994, pp.81 - 92.
115. Bakker, P.A.H.M., Ran, L., Djavaheri, M., Mercado-Blanco, J., Van Der Sluis, L., and Van Loon, L.C., « Iron regulated metabolites and disease suppression by strains of *Fluorescent pseudomonas spp* », Congrès international, RHIZOSPHERE Perspectives and challenge ; A tribute to Lorenz Hiltner, Munich, Germany, 2004, <http://www.gsf.de/iboe/congress>
116. Das, K., Katiyar, V. and Goel, R., « 'P' solubilization potential of plant growth promoting *Pseudomonas* mutants at low temperature », *Microbiol. Res*, n° 158, 2003, pp.359 - 362.
117. Brhada, S., Peix, A., Igual, J.M., Barreuco, C.R. and Aurag, J., « Effect of phosphate solubilizing bacteria on the mineral nutrition and growth of wheat under controlled conditions », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>

118. Miller, S., Rice, O., Browne, P., Higgins, P., Morrissey, J. and O'Gara, F., « Identification and functional analysis of *Pseudomonas fluorescens* f113 genes involved in phosphate solubilisation and mineralization », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
119. Igual, J.M., Valverde, A., Cervantes, E. and Velazquez, E., « Phosphate – solubilizing bacteria as inoculants for agriculture: use of updated molecular techniques in their study », Agronomie, n° 21, 2001, pp.561 - 568.
120. Miao, S., Han, X. and Qiao, Y., « Influence of various insoluble P sources on rhizosphere pH », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
121. Commission Européenne Direction générale de l'agriculture (COMM / AGRI), « L'agriculture et l'environnement », De Lacroix, E.L., Fact – sheet, 2003, pp.1 - 12, [http://europa.eu.int/comm/agriculture/index\\_fr.htm](http://europa.eu.int/comm/agriculture/index_fr.htm)
122. Richardson, A.E., « Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants », Aust. J. Plant Physiol, n° 28, 2001, pp. 897 - 906.
123. Ait Ben Hassou, H., Brhada, S., Souad, B., Bouhmouch, M.L. and Aurag, J., « Evaluation De L'activite Solubilisatrice Des Phosphates Inorganiques Chez Les Bacteries Isolees Des Nodules Du Haricot », Laboratoire de Microbiologie et Biologie Moléculaire, Faculté des Sciences, Université Mohammed V - Agdal, Rabat, Maroc, 2004, <http://www.recherphos.com/programme.htm>  
<http://www.recherphos.com/pdf/40.pdf>
124. Pietr, S.J., Karon, B. and Strankiewicz, M., « Influence of rock phosphate-dissolving rhizobacteria on the growth and P- uptake by cereals : preliminary results », pp.81 – 84, in « Plant growth promoting rhizobacteria, Progress and prospects », Keel, C., Koller, B. and Défago, G., International Union of Biological Sciences, International organisation for biological and integrated control of noxious animals and plants, WPRS Bulletin, Switzerland, 1991, pp.418.
125. Xie, J.C., « Present situation and prospects for the world's fertilizer use », Plant and Nutrition and Fertilizer Science, vol. 4, n° 4, 1998, pp.321 - 330.
126. Bennett, P.C., Choi, W.J. and Rogera, J.R., « Microbial destruction of feldspars », Mineral Management, vol. 8, n°62 A, 1998, pp.149 - 150.
127. Seong, K.Y., Höfte, M. and Verstraete, W., « Acclimatization of plant growth promoting *Pseudomonas* strain 7NSK2 in soil : Effect on population dynamics and plant growth », Soil Biology and Biochemistry, vol. 24, n° 8, 1992, pp.751 - 759.
128. Schultze, M. et Kondorosi, A., « Regulation of symbiotic root nodule development », Annu. Rev. Gen, n° 32, 1998, pp.33–57.

129. Bertrand, H., Nalin, R., Bally, R. and Cleyet-Marel, J C., « Isolation and identification of the most efficient plant growth-promoting bacteria associated with canola (*Brassica napus*) », *Biology Fertilisation Soils*, n° 33, 2001, pp.152 - 156.
130. De Salamone, I.E.G., Hynes, R.K. and Nelson, L.M., « Cytokinin production by plant growth promoting rhizobacteria and selected mutants », *Canadian Journal of Microbiology*, n° 47, 2001, pp.404 - 411.
131. Shah, S., Li, J., Moffatt, B.A. and Glick, B.R., « Isolation and characterization of ACC deaminase genes from two different plant growth-promoting rhizobacteria », *Can. J.Microbiol*, n° 44, 1998, pp.833 - 843.
132. Li, J., Ovakim, D.H., Charles, T.C. and Glick, B.R., « An ACC deaminase minus mutant of *Enterobacter cloacae* UW4 no longer promotes root elongation », *Curr. Microbiology*, n° 41, 2000, pp.101 - 105.
133. Wang, C., Knill, E., Glick, B.R. and Défago, G., « Effect of transferring 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) deaminase genes into *Pseudomonas fluorescens* strain CHA0 and its *gacA* derivative CHA96 on their growth-promoting and disease-suppressive capacities », *Canadian Journal of Microbiology*, n° 46, 2000, pp.898 - 907.
134. Cattelan, A.J., Hartel, P.G. and Fuhrmann, J.J., « Screening for plant growth-promoting rhizobacteria to promote early soybean growth », *Soil Science Soc American journal*, n° 63, 1999, pp.1670 - 1680.
135. Molla, A.H., Shamsuddin, Z.H., Halimi, M.S., Morziah, M. and Puteh, A.B., « Potential for enhancement of root growth and nodulation of soybean co-inoculated with *Azospirillum* and *Bradyrhizobium* in laboratory systems », *Soil Biol. Biochem*, n° 33, 2001, pp.457 - 463.
136. Okon, Y. and Labandera-Gonzalez, C.A., « Agronomic applications of *Azospirillum*: an evaluation of 20 years worldwide field inoculation », *Soil Biol. Biochem*, n° 26, 1994, pp.1591 - 1601.
137. Caron, J., « Recherche et développement de biopesticides et pesticides naturels à faible toxicité pour les organismes non ciblés et respectueux de l'environnement » ; Rapport final – Volet Phytopathologie, Projet PARDE n° 3333.52.02.01, Présenté au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP), 2006, pp.278.
138. Ross, I., « Biotechnologie ; Concepts et Techniques », *Applied and Environmental Microbiology*, n° 66 (APR00), pp.1609-1616, in *Bulletin des Biotechnologies*, n° 171, 2000, pp.44.

139. United states Environmental protection agency (EPA), 2007,  
<http://www.epa.gov/>  
[http://www.epa.gov/pesticides/biopesticides/ingredients/index\\_p-s.htm#p](http://www.epa.gov/pesticides/biopesticides/ingredients/index_p-s.htm#p)  
[http://www.epa.gov/pesticides/biopesticides/ingredients/factsheets/factsheet\\_006438.htm](http://www.epa.gov/pesticides/biopesticides/ingredients/factsheets/factsheet_006438.htm)  
<http://www.epa.gov/pesticides/biopesticides>
140. India Mart, 2007,  
<http://dir.indiamart.com/cgi/compcatsearch.mp?ss=Pseudomonas&searchfor=comp&modid=DIR&search=>
141. EMD Crop BioScience, 2007,  
<http://www.emdcropbioscience.com/company/index.cfm>
142. Keel, C. and G, Defago., «The fluorescent siderophore of *Pseudomonas fluorescens* starin CHAO has no effect on the supression of root diseases of wheat », pp.136 – 142, in « Plant growth promoting rhizobacteria, Progress and prospects », Keel, C., Koller, B. and Défago, G., International Union of Biological Sciences, International organisation for biological and integrated control of noxious animals and plants, WPRS Bulletin, Switzerland, 1991, pp.418.
143. Bensaid., F., « Etude de l'effet des *Pseudomonas spp.* fluorescents et de l'isolat FO47 de *Fusarium oxysporum* non pathogène dans la lutte biologique vis-à-vis des fusarioses vasculaires », Mémoire Magister, université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 2006, pp.117.
144. Jousset, A., Scheu, S. and Bonkowski, M., « Secondary metabolite production confers high competitive advantage for *Pseudomonas fluorescens* CHAO through grazing resistance against protozoan predators (*Acanthamoeba castellanii*) », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
145. Mirleau, P., Delorme, S., Philippot, L., Meyer, J.M., Mazurien, S. and Lemanceau, P., « Fitness in soi land rhizosphere of *Pseudomonas fluorescens* C7R12 compared with a C7R12 mutant affected in pyoverdine synthesis and uptake », FEMS, Microbial Ecol, n°34, 2000, pp.35 - 44
146. Weidmann, S., Brechenmacher, L., Batoux, M., Van Tuinen, D., Lemenceau, P. and Gianinazzi-Pearson, V., « Expressions communes de gènes de *M. truncatula* lors de la mycorhization, la nodulation et l'interaction avec une rhizobactérie bénéfique », UMR, INRA Dijon, France, 2001.
147. Benchabane, M., « Le dépérissement bactérien des Rosacées à noyaux : identification de l'agent causal, dynamique des populations bactériennes épiphytes et mise en évidence de l'activité galacogène *in vitro* et *in vivo* », Thèse Magister, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 1992, pp.119.

148. Bouamra, F., « Activite antagoniste chez les *Pseudomonas fluorescens* (application de *Pseudomonas fluorescens* en lutte biologique vis-à-vis du *Fusarium oxysporum f.sp lycopersici* sur la tomate cultivée sous serre », Mémoire Ingénieur, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 1992, pp.69.
149. Benani, F., « Caractérisation et utilisation de *Pseudomonas fluorescens* dans le biocontrôle de *Verticillium dahliae* Kleb de la tomate (*Lycopersicum esculentum*) et pour sa promotion de croissance », Mémoire Ingénieur, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 1993, pp.68.
150. Tidjani, S., « Essais de biocontrole de la Fusariose vasculaire de la tomate par *Pseudomonas fluorescens* », Mémoire Ingénieur, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 1993, pp.68.
151. Hachi, Z., « Effet de la bactérisation avec *Pseudomonas fluorescens* sur la biostimulation de la levée et de la croissance de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) », Mémoire Ingénieur, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 1996, pp.64.
152. Benoussaid, N., « Effet de la bactérisation des semences de blé tendre (*Triticum aestivum*) par quatres souches de *Pseudomonas fluorescens* sur la biostimulation de la croissance végétale et le biocontrole vis-à-vis de *Pythium ultimum* », Mémoire Ingénieur, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 1996, pp.119.
153. Toudji, D., « Essais d'utilisation des *Pseudomonas fluorescens* dans le biocontrole de *Fusarium oxysporum* et de *Verticillium dahliae* sur la tomate et dans la promotion de croissance végétale », Thèse Magister, INA, Alger, Algérie, 1996, pp.138.
154. Larbaoui, A., « Etude des mécanismes d'action des *Pseudomonas spp* fluorescents dans l'amélioration de la protection biologique des plantes par induction de résistance systémique vis-à-vis des fusarioses vasculaires », Mémoire Magister, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 2003, pp.94.
155. King, E.O., Ward, M.K., and Raney, D.E., « Two simple media for démonstration of pyocyanin and fluorescein », Journal of laboratory and clinical medicine, n°44, 1954, pp.301-307
156. Rousselle, P., Robert, Y. and Crosnier, J.C., « La pomme de terre ; Production, Amélioration, Ennemis et Maladies, Utilisations », INRA, Paris, France, 1996, pp.603.
157. Duchaufour, P., Souchier B. and Bonneau, M., « Pédologie ; constituants du sol : méthodes pratiques d'analyse du sol », Edition Masson, Paris, France, 1979, pp.415.
158. Demolon, A., « Principes d'agronomie », Edition DUNOD, Paris, France, 1968, pp.325.

159. Chapman, H.D. et Pratt, P.F., « Methods of analysis for soils, plants and waters », Edition University of California, Riverside, USA, 1961, pp.452.
160. Rouiller, J., « Analyses des sols : techniques de laboratoire », Edition centre de Pédologie et Biologie, Nancy, France, 1981, pp.384.
161. Rivière, A., « Méthodes granulométriques ; techniques et interprétations », Techniques et Méthodes sédimentologiques, Edition MASSON, Paris, France, 1977, pp.288.
162. Kaouritchev, I., « Manuel pratique de pédologie », Edition MIR, Moscou, Russie, 1983, pp. 278.
163. Olsen., S.R., « Estimation of available phosphorous in soils by extraction with sodium bicarbonate ». Cir. U.S. Dep. Agr, n° 939, 1954, pp.1 - 19.
164. Duval L., « Etude des conditions de validité du dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique. Conséquences pratiques », Chim. Anal, n° 45, 1963, pp.237 - 250.
165. Henin, S., Gras, A. and Monnier, D., « Le profile cultural », Edition MASSON, Paris, France, 1968, pp.258.
166. Soltner, D., « Les bases de la production végétale » Edition Siraudeau, France, 1971, pp.260
167. Diehl, R., « Agriculture générale », Edition Baillière, France, 1975, 315.
168. Toua, D., « Essai d'utilisation de *Pseudomonas fluorescens* dans le biocontrôle de *Fusarium oxysporum* et de *Verticilliose dahliae* sur tomate et dans la promotion de la croissance végétale », Mémoire Magister, INA, Alger, Algérie, 1996, pp.138.
169. Dagnelie, P., « Principes d'expérimentation », Les Presses Agronomiques de Gembloux A.S.B.L, Belgique, 1981, pp.182.
170. Gauthier, D., « Dosage des protéines ; principes théoriques : Warburg, Christian (1941) », Biochem. Zeits, 1999, pp.341 - 384.
171. Costes, C., « Protéines foliaires et alimentaires », Bordas, Paris, 1981, pp.266.
172. Catalogue néerlandais des variétés de pomme de terre, Nivaa, La Haye, CPRO-DLO, Wageningen, 1994, pp.261.
173. Howie, W.J. et Echandi, E., « Rhizobacteria: Influence of cultivar and soil type on plant growth and yield of potato », Soil Biology and biochemistry, vol. 15, Issue 2, 1983, pp.127 - 132.

174. Beauchamp, C.J., Kloepper, J.W. and Shaw, J.J., « Root colonization of various host plants by Tn5 bioluminescent *Pseudomonads* », pp.243 – 247, in « Plant growth promoting rhizobacteria, Progress and prospects », Keel, C., Koller, B. and Défago, G., International Union of Biological Sciences, International organisation for biological and integrated control of noxious animals and plants, WPRS Bulletin, Switzerland, 1991, pp.418.
175. Digat, B., « Contrôle biologique et stimulation de la germination par la bactérisation », *Phytoma ; Défense des végétaux*, n° 441, 1992, pp.34 - 38.
176. Bachir, I., « Phytostimulation des plantules de tomate, de blé dur et d'orge par leur bactérisation avec *Pseudomonas fluorescens* (CHAO et P64) », Mémoire Ingénieur, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 2006, pp.50.
177. Hofte, M., Boelens, C.M.J. and Verstraete, W., « Seed protection and promotion of seedling emergence by the plant growth beneficial *Pseudomonas* strains 7NSK2 and ANP15 », *soil biology biochem*, n° 23, 1991, pp.407 - 410.
178. Reddy, M.S. et Patrick, A.A., « Effect of Fluorescent *Pseudomonas* on growth of tobacco seedlings and suppression of black root rot caused by *Thielaviopsis basicola* », pp.23 – 29, in « Plant growth promoting rhizobacteria, Progress and prospects », Keel, C., Koller, B. and Défago, G., International Union of Biological Sciences, International organisation for biological and integrated control of noxious animals and plants, WPRS Bulletin, Switzerland, 1991, pp.418.
179. Digat, B., Gaudillat, L. and Labadie, J.M., « Susceptibility of various tomato and lettuce genotype to plant growth promoting *Pseudomonas* », *Symbiosis*, n° 9, 1990, pp.259 - 303.
180. Papadopoulos, A.P., « La culture des tomates en serre sur sol et sans sol », Agriculture Canada Publication 1865/F, 1991, pp.88.
181. Chaux, C. et Foury, C., « Productions légumières, Légumineuse potagères, Légumes fruits », Tome 3, Technique et Documentation- Lavoisier, Paris, France, 1994, pp.231.
182. Du Jardin, P., « Physiologie de la tubérisation chez la pomme de terre cultivée *Solanum tuberosum* L : quelques conclusions de données moléculaires, quel avenir pour l'amélioration des plantes ? », AUPELF – UREF, John Libbey Eurotext, Paris, France, 1994, pp.439 - 446.
183. He, J.Z. et Zheng, Y., « Fertilization affects bacterial and fungal composition and diversity of a Chinese upland red soil », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
184. Ramezanpour, M., Valed Saravi, C. and Rezaei, M., « Effect of plant growth promoting rhizobacteria on morphological and physiological characteristics and yield of wheat (*Triticum aestivum* L. cv milan) », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>

185. Kloepper, J. W., « Plant Growth Promoting Rhizobacteria as biological control agents of soilborne diseases », (1991), in Benchabane, M., « Caractérisation des effets d'antagonisme microbien et de promotion de la croissance végétale de souches de *Pseudomonas spp.* Fluorescents », Thèse Doctorat d'état, FSB-UTHB, Alger, Algérie, 2005, pp.235.
186. Scher, F.M., Kloepper, J.W. and Singleton, C., « Chemotaxis of fluorescent *Pseudomonas spp.* to soybeans seed exsudates *in vitro* and soil », Canadian journal of microbiology, n° 31, 1984, pp.570 – 574, in Bachir. I., « Phytostimulation des plantules de tomate, de blé dur et d'orge par leur bactérisation avec *Pseudomonas fluorescens* (CHAO et P64) », Mémoire Ingénieur, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 2006, pp.50.
187. Steindler, L., Bertani, I., Devescovi, G., Bigirimana, J., De Sordi, L. and Venturi, V., « Quorum sensing in rice rhizosphere *Pseudomonas* », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
188. Van Peer, R., Punte, H.L.M., Letty, A. and Schippers, B., « Characterisation of surface and Endorhizospere *Pseudomonas* in relation to their colonisation of roots », Applied and Environmental Microbiology, American Society for Microbiology, 1990, pp.2462 - 2470.
189. Ehlers. R.U., « Market potential and regulation of microbial rhizosphere organisms », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>
190. Oggerin de Orube, M., Rubio, V. and Marín, I., « PGPR, phytohormones and their influence on gene expression profiles of *Solanum lycopersicum* », Congrès international, RHIZOSPHERE 2, 2007, <http://www.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/index.html>

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

**Faculté des Sciences Agronomiques et Vétérinaires**

Département d'Agronomie

# **MEMOIRE DE MAGISTER**

Option : Amélioration des productions végétales

ADAPTATION RHIZOSPHERIQUE DES *Pseudomonas* spp.  
FLUORESCENTS ET LEURS EFFETS BENEFIQUES SUR LA  
BIOSTIMULATION DE LA CROISSANCE ET DE LA  
PRODUCTION DE LA TOMATE ET DE LA POMME DE  
TERRE

Par

**ABED Amina**

Devant un jury composé de

M. BENMOUSSA	Professeur, U. de Blida	Président
S A. BOUTAHRAOUI	Chargé de Cours, U. de Blida	Examineur
A. BOUTEKRABT	Professeur, U. de Blida	Promoteur
M. BENCHABANE	Maître de conférences, U. de Blida	Co-promoteur

Blida, Juin 2008