



UNIVERSITE D'ETAT D'HAITI

(UEH)

FACULTE D'AGRONOMIE ET DE MEDECINE VETERINAIRE

(FAMV)

DEPARTEMENT PHYTOTECHE

(PHYTO)

Contribution à l'étude d'agents de lutte biologique contre les champignons et oomycètes pathogènes du système racinaire de la tomate de serre

MÉMOIRE

Présenté par : Roudy Jean

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur- Agronome

Avril 2015

RÉSUMÉ

La tomate de serre, malgré sa grande importance, est en proie à des champignons et oomycètes pathogènes s'attaquant à son système racinaire. Ces agents pathogènes, dont *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*, les oomycètes *Pythium ultimum* et *P. aphanidermatum*, *Pyrenochaeta lycopersici*, et *Rhizoctonia solani*, causent des maladies graves pouvant faire chuter considérablement le rendement. Pour lutter contre ces champignons et oomycètes pathogènes, on a souvent recours aux fongicides chimiques de synthèse, mais leur utilisation abusive a engendré à long terme l'apparition de phénomène de résistance et, en plus, la pollution de l'environnement. De ce fait, il s'avère nécessaire d'orienter les recherches vers l'adoption de stratégies de lutte très efficaces et moins risquées. Dans le cadre de ce séminaire, on a opté pour la lutte biologique, un moyen de lutte respectueux de l'environnement. C'est à juste titre qu'on a émis l'hypothèse selon laquelle l'utilisation d'agents de lutte biologique permet de lutter efficacement contre les champignons et oomycètes pathogènes du système racinaire de la tomate de serre tout en gardant un rendement élevé. Axé sur une démarche méthodologique basée essentiellement sur la lecture et l'analyse d'articles scientifiques portant sur des travaux réalisés ici (Canada) et ailleurs, ce travail a permis de déceler quelques agents de lutte biologique de types fongiques et bactériens ayant fait leur preuve dans la répression des maladies racinaires de la tomate de serre causées par les champignons et oomycètes pathogènes retenus dans le cadre ce séminaire. Les bactéries *Bacillus subtilis* souche EU07 et *Pseudomonas putida* PCL1760 se sont montrées très efficaces contre *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*, *Pseudomonas syringae* souche 1 et *Trichoderma atroviride* contre *Pythium ultimum*, *Trichoderma harzianum* et *Streptomyces* sp. contre *Pyrenochaeta lycopersici*, et enfin *Trichoderma harzianum* contre *Rhizoctonia solani*. Tout compte fait, l'utilisation d'agents de lutte biologique pour lutter contre les maladies des cultures en serre est une avenue très prometteuse. D'où la nécessité de stimuler la recherche!

Mots clés : *Lycopersicum esculentum*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*, *Pythium ultimum* et *P. aphanidermatum*, *Pyrenochaeta lycopersici*, *Rhizoctonia solani*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas putida*, *Trichoderma harzianum*, lutte biologique

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en tout premier lieu, le grand Dieu Jéhovah, pour son soutien et ses sollicitudes démontrés à mon égard.

Je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance à mon encadreur Daniel Dostaler pour son assistance et ses remarques pertinentes ; ses précieux conseils et commentaires m'ont amplement aiguillonné tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier Pierre Mathieu Charest, vice-doyen de la Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation et l'Université Laval qui ont su me gratifier cette opportunité inestimable.

Enfin de compte, mes chaleureux remerciements vont :

- À ma mère, Marie Lancye Jean ;
- Au directeur du Département de Phytotechnie, TESCAR Robers- Pierre ;
- Au doyen de la FAMV, Jocelyn Louissaint ;
- À toute l'équipe pédagogique de la FAMV ;
- Au responsable du séminaire, Olivier Soucy ;
- À mes collègues stagiaires d'Haïti ;
- À tous mes camarades de la FAMV particulièrement : Marcelin Sadrack, Jeudi Jackson, Jeannot Benet, Dumersaint Paul Obed, Phanord Jhon Wadner Kerson, Ilmo Pierre-Mackenson, Esterlin Micodème, Simon cedernier ;
- À mes amis : Val Jhonny, Fils-Aimé Henry Hans, Imozis Dony Frantzy.

Table des matières

RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
I.-INTRODUCTION	8
II.-DÉVELOPPEMENT.....	10
2.1.- La lutte biologique.....	10
2.1.1.- Intérêt porté à la lutte biologique.....	10
2.1.2.-La lutte biologique contre les agents pathogènes telluriques des plantes.....	12
2.1.3.-La lutte biologique en serre	14
2.1.4.-Les micro-organismes antagonistes impliqués dans la lutte biologique.....	14
2.3.-Les champignons et oomycètes pathogènes du système racinaire de la tomate de serre.....	17
Consultés: Agrios (2005), Blancard (2009), Jarvis (1992), Richard et Boivin (1999), Roberts et Boothroyd (1984).....	18
2.3.- Impact de l'utilisation d'agents de lutte biologique dans la répression des maladies racinaires de la tomate de serre et sur le rendement en fruits	18
2.3.1.-Efficacité des agents antagonistes contre le FORL.....	18
2.3.2.-Efficacité des agents antagonistes contre <i>Pythium</i> spp.....	24
2.3.3.-Efficacité des agents antagonistes contre <i>Pyrenochaeta lycopersici</i> ..	

2.3.4.-Efficacité des agents antagonistes contre <i>Rhizoctonia solani</i>	30
III.-CONCLUSION.....	33
BIBLIOGRAPHIE	35
IV-ANNEXES	43

PDF Pro Evaluation

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Micro-organismes antagonistes des agents pathogènes telluriques de quelques cultures maraichères	16
Tableau 2. Quelques Biofongicides dérivés d'agents de lutte biologique homologués au Québec	17
Tableau 3. Maladies du système racinaire de la tomate de serre	18
Tableau 4. Effets de deux souches de <i>Bacillus subtilis</i> sur la gravité de la fusariose des racines et du collet de la tomate de serre	19
Tableau 5. Effets de deux Biofongicides sur la gravité de la fusariose des racines et du collet de la tomate de serre	20
Tableau 6. Effets de deux symbioses mycorhiziennes sur le rendement en fruits de la tomate de serre infectée par le FORL	23
Tableau 7. Effets d'un biosurfactant produit par <i>Pseudomonas koreensis</i> sur le développement de la pourriture pythienne de la tomate de serre infectée par <i>Pythium ultimum</i>	25
Tableau 8. Effets de quelques agents de lutte biologique sur la pourriture racinaire de la tomate de serre causée par <i>Pythium ultimum</i>	26
Tableau 9. Effets de quelques agents de lutte biologique sur le rendement en fruits commercialisables de tomates de serre attaquées par <i>Pythium ultimum</i>	27
Tableau 10. Valeurs de l'indice de McKinney (%) comparées de bactéries et hyphomycètes dans la lutte biologique à la maladie des racines liégeuses de la tomate de serre	29
Tableau 11. Efficacité de préparations commerciales (Standard) à base d'agents antagonistes sur la croissance de la tomate de serre.....	30
Tableau 12. Effets de <i>Pseudomonas fluorescens</i> et de <i>Bacillus subtilis</i> dans la réduction de la fonte des semis de tomate de serre causée par <i>Rhizoctonia solani</i>	31

LISTE DES FIGURES

Figure 1- <i>Influence d'une souche de Pseudomonas sur la germination des semences de tomate de serre infectées par le FORL</i>	22
Figure 2- <i>Influence d'une souche de Pseudomonas sur la gravité de la fusariose des racines et du collet de la tomate de serre causée par le FORL</i>	22
Figure 3. <i>Effets de deux souches de Trichoderma harzianum sur la germination des semences et l'incidence de la fonte des semis de la tomate de serre causée par R. solani</i>	32

PDF Pro Evaluation

I.-INTRODUCTION

Le Canada figure parmi les cinq plus grands producteurs mondiaux de légumes de serre. En 2013, près de 14 millions de mètres carrés étaient consacrés à la production de légumes de serre ; celle-ci s'élevait à 605 050 tonnes métriques (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2013). De tous les légumes produits en serre au Canada, la tomate est de loin le plus important. Sa production a généré, en 2011, une valeur à la ferme de 496 millions de dollars (M\$). Au cours de cette même année, la superficie récoltée était estimée à 540 ha, dont 97% étaient concentrés principalement en Colombie-Britannique, au Québec, et en Ontario (AAC, 2011). Le Québec occupe le troisième rang national avec une superficie consacrée à la production de tomates de serre de 80,2 ha (Institut de la Statistique du Québec, 2014). La tomate de serre y occupe une place très importante tant sur le plan alimentaire qu'économique. Elle est consommée crue, en salade, et utilisée dans la préparation de sauces et de soupes. Elle constitue aussi une excellente source en vitamine C et contient du lycopène, un antioxydant censé prévenir le cancer (AAC, 2011). La valeur générée à la ferme, en 2011, se chiffrait à plus de 68 M\$ (Statistique Canada, 2011).

Pour accroître les rendements en serre, les producteurs, en plus de l'amélioration du contrôle climatique et du développement de cultivars plus performants ont eu recours à diverses technologies, dont la culture hydroponique, lorsque les plantes sont cultivées sur solutions nutritives. S'il est vrai que l'introduction de ces technologies en serres a contribué à l'augmentation des rendements, n'empêche qu'elles présentent certains désavantages. Les recherches ont montré que les cultures hydroponiques qui utilisent des substrats inertes sont généralement favorables au développement de maladies causées par des champignons et oomycètes telluriques s'attaquant au système racinaire de la tomate (Paulitz et Bélanger, 2001). Ces agents pathogènes peuvent s'y introduire par le truchement des substrats, de la poussière, d'outils et de semences contaminés, et sont capables de se développer et se propager même dans les substrats sol ou hors sol désinfectés (Paulitz et Bélanger, 2001). Ce sont

essentiellement *Pythium* spp, *Fusarium* spp, *Rhizoctonia solani* (El-Mohamedy et al., 2014 ; Abdel-Kader et al., 2012) et *Pyrenochaeta lycopersici* (Schneider et Gerlach, 1966 cités dans Vitale et al, 2011). Ces agents pathogènes causent des maladies graves, entre autres, les pourritures racinaires et le flétrissement, et réduisent considérablement le rendement et la qualité des cultures.

Pour lutter contre ces maladies, diverses stratégies ont été adoptées, dont la lutte chimique consistant à utiliser des fongicides chimiques de synthèse. Cependant l'utilisation de ces produits chimiques présente certains inconvénients, dont leur coût, les pollutions de l'environnement et des aliments et ses conséquences sur la vie humaine, et l'apparition de souches plus résistantes de ces agents pathogènes (AAC, 2013 ; Abdel-Kader et al., 2012 ; Weller et al., 2002). De ce fait, l'orientation des recherches vers l'adoption de stratégies de lutte, qui se révéleraient plus efficaces et plus respectueuses de l'environnement, s'avérait incontournable. Parmi ces stratégies visées, il y a la lutte biologique. Le terme « lutte biologique », selon Lee et al. (2013), se rapporte à l'utilisation de micro-organismes pour réprimer les maladies des plantes, et l'organisme ayant le pouvoir supprimeur est appelé « Agent de lutte biologique ». De ces micro-organismes, on trouve certains champignons et bactéries. L'augmentation de la population de ces agents antagonistes au voisinage d'une plante peut réprimer le développement des agents pathogènes sans produire d'effets négatifs sur le reste de la communauté microbienne. Selon Abdel-Kader et al. (2012), l'application de la lutte biologique par l'utilisation de ces antagonistes s'est avérée très efficace pour réprimer diverses maladies des plantes dans de nombreux pays.

En conséquence, on émet l'hypothèse que l'utilisation de ces agents de lutte biologique permet de lutter efficacement contre les champignons et oomycètes pathogènes du système racinaire de la tomate de serre.

À cette fin, on se propose, par une recherche bibliographique mettant particulièrement l'emphase sur les résultats novateurs et appliqués, d'évaluer l'efficacité de

l'utilisation des agents de lutte biologique dans la répression des maladies racinaires de la tomate serre. De ce fait, on procédera d'abord à la caractérisation des agents antagonistes utilisés pour la répression de ces agents pathogènes. Par la suite, on fera ressortir l'impact de l'utilisation de ces agents de lutte biologique dans la suppression de ces maladies et sur le rendement en fruits.

II.-DÉVELOPPEMENT

2.1.- La lutte biologique

2.1.1.- Intérêt porté à la lutte biologique

Au cours des années, vu l'augmentation croissante qu'a connue la population humaine, il s'avérait important de recourir à des mesures rigoureuses pour pouvoir lutter contre les maladies des cultures en vue de garantir l'expansion et la productivité agricole. Pour y parvenir, diverses approches ont été adoptées. Ce sont essentiellement les bonnes pratiques culturales, l'utilisation de variétés résistantes (par exemple, l'esquive par la résistance du porte greffe –Grafting/disease escape – serait un moyen de lutte par excellence contre la pourriture des racines et du collet, selon Jarvis (1985) et McGorven (2015)) et l'usage de pesticides chimiques de synthèse (Lee et al., 2013 ; Brisa et al., 2007 cités dans Mezeal, 2014). Néanmoins, l'application excessive et le mauvais usage de ces pesticides chimiques ont conduit à la pollution de l'environnement et la dégradation de l'innocuité des aliments consommés (Abdel-Kader et al., 2012 ; Suprpta, 2012). Ces risques liés à l'utilisation des pesticides chimiques de synthèse ont porté tant les chercheurs que les producteurs à prendre conscience de la nécessité de développer des stratégies de lutte moins risquées, c'est-à-dire plus respectueuses de l'environnement (Suprpta, 2012 ; Moorman, 2011). Parmi ces dernières stratégies développées, il y a la lutte biologique. Durant ces dernières décennies, la lutte biologique par l'utilisation de micro-organismes antagonistes aux agents pathogènes des plantes est perçue comme une avenue préférable à l'utilisation des fongicides de synthèse.

Le terme «lutte biologique» est utilisé dans différents domaines de la biologie, spécifiquement en Entomologie et en Phytopathologie. En Entomologie, on réfère à l'utilisation d'insectes vivants prédateurs, nématodes entomopathogènes, ou agents pathogènes microbiens pour réprimer les populations de différents insectes ravageurs, alors qu'en Phytopathologie, on réfère à l'utilisation de micro-organismes antagonistes pour réprimer les maladies des plantes (Driesche et Bellows, 1996 ; Pal et Gardener, 2006). Dans les deux (2) cas, l'agent supprimeur prend le nom de «Agent de lutte biologique» (Lee et al., 2013). Plus largement, ce terme intègre l'utilisation de produits naturels ou extraits de végétaux ou de micro-organismes antagonistes (Pal et Gardener, 2006).

Cependant, nombreux sont les auteurs qui ne s'entendent pas sur toutes les définitions données de la lutte biologique. Selon Driesche et Bellows (1996), la lutte biologique est « un processus agissant sur les populations et par lequel la densité de population d'une espèce est abaissée par l'effet d'une autre espèce qui agit par prédation, parasitisme ou compétition ». Il ressort de cette définition que la lutte biologique ne se réfère qu'à l'utilisation de vivant pour combattre le vivant. Par conséquent, selon ces auteurs, tous les moyens de lutte non-chimiques ne relèveraient pas de la lutte biologique. Par exemple, l'utilisation de produits chimiques dérivés de végétaux ou de micro-organismes antagonistes, ainsi que les pratiques, telles que les amendements de sols, les rotations culturales, la solarisation et la fumigation des sols (Whipps, 2001), destinées à influencer l'environnement physicochimique et microbiologique pour la répression des maladies ne sont pas de la lutte biologique. Pourtant, la définition donnée par Garrett (1965) telle que reprise par Gravel (2007) est beaucoup plus large. Elle se réfère à « toute condition ou pratique sous laquelle la survie ou l'activité d'un agent pathogène est réduite par l'entremise d'un autre organisme vivant (à l'exception de l'homme) avec pour résultat la réduction de la maladie causée par cet agent pathogène ». Cook et Baker (1983) cités dans Paulitz et Bélanger (2001) ont abondé dans le même sens. Ils ont défini la lutte biologique comme « la réduction de

la densité de l'inoculum ou de la maladie causée par un agent pathogène ou un parasite dans son stade actif ou dormant, par un ou plusieurs organismes, soit de façon naturelle ou par manipulation de l'environnement, de l'hôte ou d'un agent antagoniste ou par l'introduction massive d'un ou de plusieurs agents antagonistes ».

Contrairement à Driesche et Bellows (1996), Cook et Baker (1983) cités dans Paulitz et Bélanger (2001) n'excluent pas, comme faisant partie de la lutte biologique, l'utilisation de produits dérivés des micro-organismes antagonistes. Selon eux, en Phytopathologie, la lutte biologique intègre non seulement l'utilisation d'agents antagonistes, mais aussi les produits extraits de ces agents pour réprimer les activités ainsi que les populations d'un ou plusieurs agents pathogènes des plantes. Essentiellement, les publications auxquelles on s'est intéressé dans le cadre de cette étude ont pris en compte les produits dérivés et les agents antagonistes. On retient, en conséquence, la définition de la « Lutte biologique » donnée par Cook et Baker (1983), telle que reprise par Paulitz et Bélanger (2001).

2.1.2.-La lutte biologique contre les agents pathogènes telluriques des plantes

Les microbiologistes sont arrivés à une meilleure compréhension des relations entre les micro-organismes telluriques et les différentes interactions de ceux-ci avec les plantes. Ils ont acquis d'énormes connaissances sur les mécanismes de fonctionnement de ces micro-organismes ainsi que sur leurs activités. Au cours de leurs recherches, ils ont découvert, d'une part, une variété de micro-organismes qui ont des propriétés particulièrement adaptées à la répression des agents pathogènes du sol responsables des maladies racinaires des plantes (Larkin et Fravel, 1998) ; d'autre part, qu'il existe de nombreuses plantes qui sont capables de mettre en œuvre des stratégies de défense contre les agents pathogènes du sol (Weller et al., 2002). Ces mécanismes de défense impliquent la stimulation sélective et le soutien des micro-organismes antagonistes de la rhizosphère. Ces agents antagonistes sont capables de compétitionner avec les agents pathogènes du sol (Wisniewski et Wilson, 1992 cités

dans Gravel, 2007), ou d'inhiber leur fonctionnement (Campbell, 1989) sans toutefois porter préjudice aux organismes non pathogènes. La découverte de tels agents de lutte biologique et la mise en évidence de leur capacité à réduire l'incidence et la gravité des maladies ont frayé la voie à d'autres recherches encore plus prometteuses (Alabouvette et al., 1993).

Outre l'identification des micro-organismes antagonistes, ces travaux de recherche ont permis de mettre au point des préparations microbiennes permettant aussi de lutter contre ces agents pathogènes. Aux yeux de plus d'un, l'utilisation de l'activité des micro-organismes antagonistes est un moyen très efficace pour prévenir ou réprimer les maladies des plantes. Lee et al. (2013) ont fait remarquer, à juste titre, que toute augmentation de la population des micro-organismes antagonistes de la rhizosphère contribuera considérablement à la réduction des maladies sans toutefois porter atteinte aux autres micro-organismes de l'écosystème. Xu et al. (2011), pour leur part, affirment que l'utilisation efficace de ces agents antagonistes est une composante déterminante de l'agriculture durable.

S'il est vrai que les commentaires relatifs aux bienfaits de la lutte biologique sont très élogieux, néanmoins, d'autres chercheurs admettent que, contrairement à la lutte biologique contre les insectes ravageurs des cultures, la lutte biologique contre les maladies du sol est relativement limitée. Selon Handelsman et Stabb (1996), la lutte biologique des maladies transmises par le sol est très complexe parce que ces maladies se produisent dans un environnement dynamique qu'est la rhizosphère, région qui est surtout sujette à des changements rapides. De plus, les processus écologiques déterminant le succès ou l'échec du contrôle de la diversité biologique sont complexes (Xu et al., 2011) ; ces limitations sont surtout rencontrées en plein champ.

2.1.3.-La lutte biologique en serre

En serres, les systèmes hydroponiques offrent de précieux avantages dont la réutilisation des solutions nutritives excessives et la gestion de l'eau et de l'apport de nutriments dans ces systèmes (Khalil et Alsanius, 2010). Cependant, ces systèmes favorisent le développement de certaines maladies causées par des agents pathogènes tels *Pythium* spp, *Phytophthora* spp, et *Fusarium* spp s'adaptant aux conditions humides régnant à l'intérieur des serres (Khalil et Alsanius, 2010 ; Paulitz et Bélanger, 2001).

Même si les conditions environnementales des serres sont propices au développement d'agents pathogènes, mais contrairement aux conditions en plein champ, elles favorisent une meilleure répression de ces agents pathogènes par l'utilisation d'agents de lutte biologique (Moorman, 2011). Les conditions favorisant le développement de ces agents pathogènes sont pratiquement les mêmes que celles qui sont propices au développement des agents antagonistes ; en revanche ces conditions peuvent être contrôlées en serre. On peut optimiser ces conditions pour réprimer les agents pathogènes des plantes par l'utilisation de micro-organismes antagonistes (Paulitz et Bélanger, 2001) ; c'est ce qui rend plus élevées les chances de réussite de la lutte biologique en serre qu'en plein champ.

2.1.4.-Les micro-organismes antagonistes impliqués dans la lutte biologique

Beaucoup de micro-organismes sont reconnus pour leur capacité à réduire le développement d'une maladie. Parmi ces agents antagonistes qui ont démontré un bon potentiel de lutte, on trouve des bactéries et des champignons et oomycètes (Chandel et al., 2010). Ce sont essentiellement les espèces de *Pseudomonas*, *Streptomyces*, et *Bacillus*, les champignons et saprophytes tels *Trichoderma* spp, et les souches non pathogènes de *Fusarium* spp et l'oomycète *Pythium* spp (Gerbore et al., 2014 ; Vos et al., 2014 ; Chandel et al., 2010 ; Khalil et Alsanius, 2010 ; Benhamou et al., 2012). Ces agents antagonistes sont impliqués dans la répression de

quelques agents pathogènes telluriques de quelques cultures (Tableau 1). Ces agents de lutte biologique expriment leur antagonisme contre les agents pathogènes des plantes par les mécanismes suivants : l'antibiose, la compétition, et le parasitisme (Gerbore et al., 2014 ; Vos et al., 2014 ; Benhamou et al., 2012 ; Paulitz et Bélanger, 2001 ; Whipps, 2001). Ces mécanismes résultent de l'interaction des micro-organismes antagonistes avec les agents pathogènes et forment ce qu'on appelle l'antagonisme direct (annexe 1) (Hyakumachi, 2013).

Gerbore et al. (2014) définissent l'antibiose comme l'interaction au cours de laquelle un agent antagoniste produit des métabolites secondaires appelés antibiotiques qui inhiberaient les agents pathogènes du sol. Par exemple, selon Jacques et al. (1993), les *Pseudomonas fluorescens* produisent un antibiotique dénommé pyolutéorine (annexe 2) qui inhiberait la croissance de *Pythium ultimum*. La compétition, quant à elle, correspond à la lutte qui se fait entre les agents antagonistes et les agents pathogènes du sol pour les substances nutritives, en particulier, les sources de carbone et d'azote dans le sol et autour de la rhizosphère. La compétition peut aussi se faire pour la niche écologique (Benhamou et al., 2012 ; Gravel, 2007 ; Compant et al., 2005). Enfin, il y a parasitisme quand un agent antagoniste exerce une activité pathogène contre un agent pathogène (annexe 3). L'agent antagoniste détruit les parois cellulaires de l'agent pathogène par la sécrétion d'enzymes spécifiques telles les chitinases (Vos et al., 2014 ; Paulitz et Bélanger, 2001).

Outre les mécanismes mentionnés plus haut, il y a l'induction des mécanismes de défense de la plante et la stimulation des mécanismes de croissance des plantes (annexe 1) (Benhamou et al., 2012 ; Beneduzi et al., 2012 ; Compant et al., 2005). Et les champignons et les bactéries sont capables de stimuler la croissance des plantes. Les champignons ayant cette propriété sont appelés *Plant growth-promoting fungi* (PGPF) (Vos et al., 2014), et les bactéries, *Plant growth-promoting rhizobacteria* (RGPR) (Almaghrabi et al., 2013 ; Beneduzi et al., 2012).

Tableau 1. Micro-organismes antagonistes des agents pathogènes telluriques de quelques cultures maraichères

Agents pathogènes telluriques	Micro-organismes antagonistes	Plantes hôtes
<i>F.oxysporum</i> f.sp. <i>radicis-lycopersici</i>	- <i>Pseudomonas fluorescens</i>	- Tomate
	- <i>P. chlororaphis</i> PCL 1391	- Tomate
	- <i>Fusarium oxysporum</i> non pathogène	- Tomate
<i>F. oxysporum</i> f. sp <i>lycopersici</i>	- <i>Trichoderma harzianum</i>	-Tomate
	- <i>Streptomyces griseoviridis</i> souche K61	-Tomate
<i>Pyrenochaeta lycopersici</i>	- <i>Trichoderma harzianum</i>	-Tomate
	- <i>Streptomyces griseoviridis</i> souche K61	-Tomate
<i>Pythium aphanidermatum</i>	- <i>Bacillus subtilis</i>	-Laitue, Tomate
	- <i>Pseudomonas aureofaciens</i>	-Concombre
	- <i>Pseudomonas chlororaphis</i>	-Tomate
	- <i>Pythium oligandrum</i>	-Poivron
	- <i>Trichoderma harzianum</i>	-Concombre
<i>P. ultimum</i>	- <i>Bacillus subtilis</i> QST713	-Concombre
	- <i>Fusarium oxysporium</i>	-Concombre
	- <i>Trichoderma harzianum</i>	-Concombre, Laitue
<i>Rhizoctonia solani</i>	- <i>Bacillus</i> spp	-Tomate
	- <i>Trichoderma harzianum</i> KRL-AG2	-Tomate

Adapté de Gravel (2007) et de Whipps (2001)

Au Québec, plusieurs produits commerciaux à base d'agents de lutte biologique sont homologués dans les cultures en serre (Tableau 2).

Tableau 2. Quelques Biofongicides dérivés d'agents de lutte biologique homologués au Québec

Biofongicides	Matière active	No d'homologation	Cultures	Agents pathogènes
MYCOSTOP	<i>Streptomyces griseoviridis</i> lignée K61	26265	-Tomate -Poivron -Concombre	- <i>Fusarium</i> spp - <i>Pythium</i> spp
ROOTSHIELD HC	<i>Trichoderma harzianum</i> souche T-22	27115	-Tomate -Poivron -Concombre	- <i>Fusarium</i> spp - <i>Pythium</i> spp - <i>R. solani</i>
ROOTSHIELD WP	<i>Trichoderma harzianum</i> souche T-22	29890	-Tomate -Poivron -Concombre	- <i>Fusarium</i> spp - <i>Pythium</i> spp - <i>R. solani</i>
PRESTOP	<i>Gliocladium catenulatum</i> lignée J1446	28820	-Tomate -Poivron -Concombre -Laitue	- <i>Pythium</i> spp <i>R. solani</i>

Fontaine et Marcoux (2014)

Source : <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap/documents/b03gen14.pdf>

<http://www.sagepesticides.qc.ca>

2.3.-Les champignons et oomycètes pathogènes du système racinaire de la tomate de serre

En serre, la tomate est en proie à un grand nombre de pathogènes de types fongiques et oomycètes qui peuvent affecter grandement son système racinaire (El-Mohamedy et al., 2014). Parmi ces agents pathogènes, on peut citer *Pythium* spp, *Fusarium oxysporum* f. sp *radicis-lycopersici* (FORL), *Rhizoctonia solani*, *Pyrenochaeta lycopersici*, et peuvent entraîner entre autres des fontes de semis, des pourritures racinaires et des flétrissements vasculaires (Tableau 3).

Tableau 3. Maladies du système racinaire de la tomate de serre

Maladies racinaires	Agents pathogènes	Références
Fonte des semis	<i>Pythium</i> spp	Gravel et al. (2006)
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Paulitz et Belanger (2001)
Pourriture fusarienne des racines et du collet	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>radicis-lycopersici</i> (FORL)	Zhang et al. (2015)
Pourriture pythienne	<i>Pythium</i> spp	Gravel et al. (2006)
Racines liégeuses	<i>Pyrenochaeta lycopersici</i>	Fiume et Fiume (2008)
Flétrissement fusarien	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>lycopersici</i> (FOL)	Shanmugam et Kanoujia (2011)

Consultés: Agrios (2005), Blancard (2009), Jarvis (1992), Richard et Boivin (1999), Roberts et Boothroyd (1984)

2.3.- Impact de l'utilisation d'agents de lutte biologique dans la répression des maladies racinaires de la tomate de serre et sur le rendement en fruits

2.3.1.-Efficacité des agents antagonistes contre le FORL

➤ Efficacité des bactéries antagonistes

Les bactéries représentent d'excellents agents de lutte biologique contre le FORL de la tomate de serre. Ces agents de lutte biologique peuvent entraîner une réduction de l'incidence et de la gravité de la maladie, mais aussi peuvent améliorer la croissance de la plante. Parmi ces bactéries ayant déjà fait preuve d'un bon potentiel de lutte contre le FORL, on retrouve des *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp.

- *Bacillus* spp.

Les *Bacillus* spp. présentent une grande efficacité dans la répression de la fusariose des racines et du collet de la tomate de serre. Szczechura et al. (2013) ont montré que l'utilisation des souches de *B. megaterium* contre le FORL a permis de réduire de 75% l'incidence de la maladie. Saidi et al. (2009) ont mis en évidence l'efficacité du *B. subtilis* contre le FORL. Les semences de tomate traitées avec des isolats de *B.*

subtilis ont permis d'augmenter la population des plantes saines de 33 à 96,8%. Quatre isolats ont réduit l'incidence de la maladie jusqu'à 20%. Cette étude a également mis en relief l'implication des *Bacillus* dans l'amélioration de la croissance de la plante. Les résultats de Saidi et al. (2009) s'accordent avec ceux de Baysal et al. (2008). Ces derniers ont aussi montré l'efficacité des *Bacillus* dans la répression de la fusariose des racines et du collet de la tomate de serre (Tableau 4).

L'efficacité des bactéries antagonistes dans la réduction de la gravité de la fusariose des racines et du collet de la tomate de serre a été aussi mise en évidence par Zhang et al. (2015). Ils ont rapporté que deux Biofongicides à base de bactéries antagonistes, dont *Pseudomonas fluorescens* et *Bacillus subtilis*, ont réduit significativement la gravité de cette maladie. Comparés au benomyl, un fongicide chimique de synthèse, ces biofongicides ont produit des effets significatifs. Aucune différence significative n'a été obtenue entre les traitements à base de biofongicides et le traitement benomyl. De plus, ces biofongicides ont favorisé le développement racinaire de la tomate de serre (Tableau 5).

Tableau 4. Effets de deux souches de *Bacillus subtilis* sur la gravité de la fusariose des racines et du collet de la tomate de serre

Traitements	Hauteur des plants (cm)	Gravité de la maladie (%)
Témoin	11,5a*	98a
<i>B. subtilis</i> souche EU07	14,5b	35b
<i>B. subtilis</i> souche QST	10,2c	64c

*Les valeurs accompagnées de lettres différentes sont significativement différentes selon le test de Fisher ($P > 0,05$).
Adapté de Baysal et al. (2008)

Tableau 5. Effets de deux Biofongicides sur la gravité de la fusariose des racines et du collet de la tomate de serre

Traitements	Gravité de la maladie (%)	Longueur des racines (cm)
Témoin	00 ± 00 c*	137 ± 08 c
FORL	30 ± 00 a	72 ± 02 d
Benomyl	16 ± 01 b	154 ± 04 ab
Pf 9A-14	12 ± 00 b	148 ± 03 bc
Bs 8B-1	14 ± 01 b	163 ± 06 a

*Les valeurs accompagnées de lettres différentes sont significativement différentes selon le test de Fisher ($P > 0,05$).

Adapté de Zhang et al. (2015)

- *Pseudomonas* spp

À l'instar des *Bacillus* spp, les *Pseudomonas* sont aussi reconnus pour leur aptitude à protéger les cultures en serre contre les agents pathogènes. Plusieurs souches de *Pseudomonas* sp. ont été utilisées pour lutter contre le FORL chez la tomate de serre. Des études menées par Postma et al. (2013) ont mis en évidence l'efficacité de certaines souches dans la répression de cette maladie. Par exemple, lorsqu'ils ont inoculé des semences cultivées en plein sol et en laine de roche avec le FORL, 74 à 84% de plantes ont présenté les symptômes de la maladie. Cependant, ils ont rapporté une augmentation significative des plantes saines en traitant les semences avec le *Pseudomonas chlororaphis* 4.4.1. Ces résultats confirment ceux obtenus par Puopolo et al. (2011). Ces derniers, avec la souche *Pseudomonas chlororaphis* M71, ont précisé que ces bactéries sont efficaces dans la lutte contre le FORL.

Les *Pseudomonas fluorescens* et *P. putida* ont aussi montré un bon potentiel de lutte biologique contre le FORL chez la tomate de serre. Szczechura et al. (2013) ont passé

en revue les moyens de lutte contre le FORL ; ils ont affirmé que le *P. fluorescens* souche WCS356 a réduit de 96 à 7% l'incidence de la fusariose des racines et du collet chez la tomate de serre. Validov et al. (2009), pour leur part, ont travaillé avec la souche *P. putida* PCL1760. Cette souche peut réduire la gravité de la maladie (Fig. 1), mais aussi diminuer les effets négatifs de l'agent pathogène sur la germination des semences de la tomate (Fig. 2). En général, les *Pseudomonas* sp. expriment leur antagonisme par la production de substances antibiotiques et d'enzymes hydrolytiques, mais elles pourraient aussi le faire par la compétition pour les nutriments et la niche écologique. C'est ce qui s'est probablement produit lors de l'expérience réalisée par Validov et al. (2009). Lors de cette expérience, la laine de roche, un substrat pauvre en nutriment, a été utilisée. Ce manque de richesse du substrat en nutriment aurait probablement entraîné une compétition entre l'agent pathogène et *P. putida* pour les exsudats racinaires. L'aptitude de l'agent antagoniste en question à coloniser les surfaces racinaires lui aurait permis de prendre le dessus sur l'agent pathogène, ce qui, par voie de conséquence, aurait inhibé le développement de l'agent pathogène.

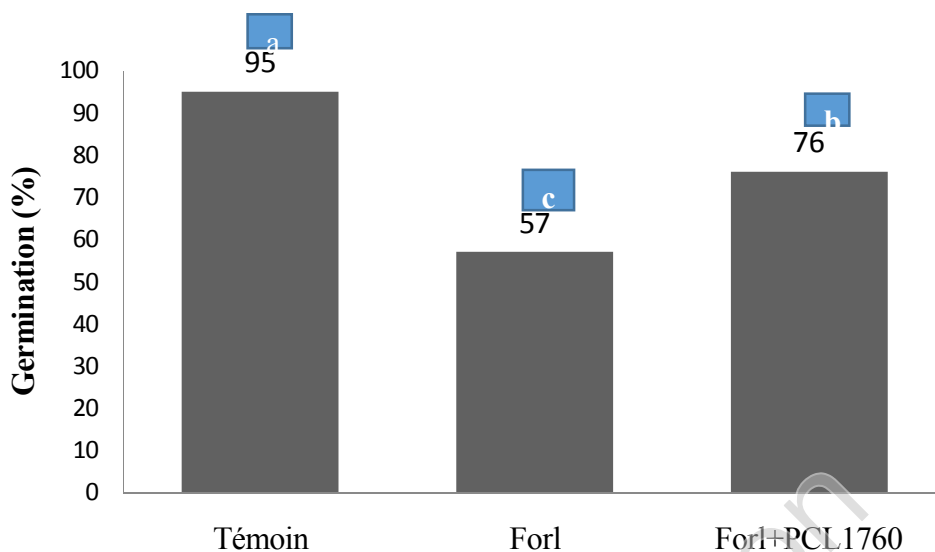


Figure 1- Influence d'une souche de *Pseudomonas* sur la germination des semences de tomate de serre infectées par le FORL

Les traitements accompagnés de lettres différentes sont significativement différents selon le test de comparaisons multiples de Duncan ($P < 0,05$). Adaptée de Validov et al. (2009)

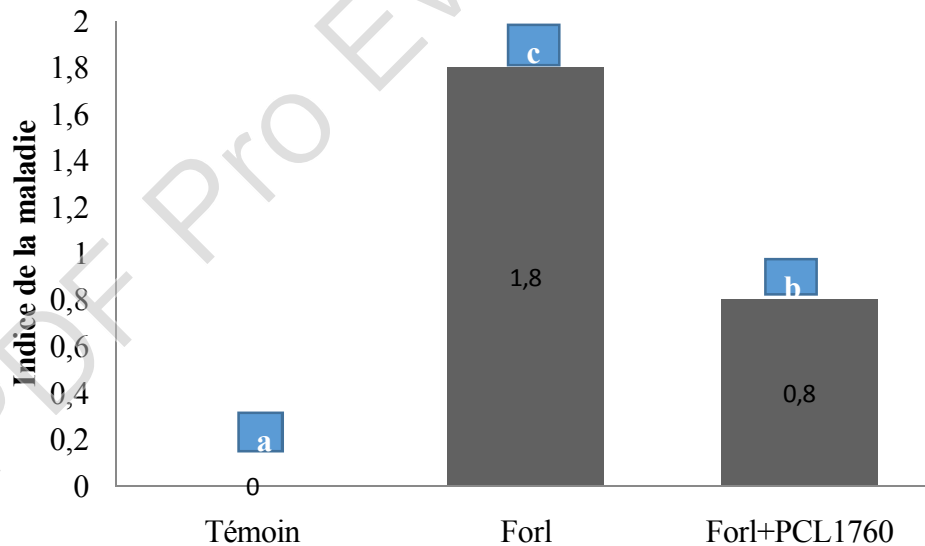


Figure 2- Influence d'une souche de *Pseudomonas* sur la gravité de la fusariose des racines et du collet de la tomate de serre causée par le FORL

Les traitements accompagnés de lettres différentes sont significativement différents selon le test de comparaisons multiples de Duncan ($P < 0,05$). Adaptée de Validov et al. (2009)

➤ Efficacité des champignons antagonistes

À l'instar des agents antagonistes bactériens, quelques champignons non pathogènes présentent une certaine efficacité dans la répression de la fusariose des racines et du collet de la tomate de serre. Des champignons antagonistes, les champignons arbusculaires mycorhiziens (AMF) en particulier, ont été utilisés avec succès. En plus de leur efficacité dans la réduction de l'incidence et de la gravité des maladies de la tomate de serre causées par les agents pathogènes telluriques, les agents de lutte biologique améliorent le rendement en fruits de la tomate de serre. Utkhede (2006) rapporte que les champignons arbusculaires mycorhiziens (AMF) sont capables d'augmenter le rendement total de la tomate de serre infectée par un agent pathogène tellurique. Il a obtenu un rendement en fruits élevé lorsque des plants de tomate de serre inoculés par le FORL ont été traités avec deux AMFs dont le *Glomus mosseae* et le *G. monosporum*. Une augmentation significative du rendement en fruits et du nombre total de fruits a été obtenue par rapport au traitement témoin inoculé (Tableau 6) (Utkhede, 2006). Selon lui, ces résultats probants n'ont fait que confirmer les travaux d'Al-Momany (1987).

Tableau 6. Effets de deux symbioses mycorhiziennes sur le rendement en fruits de la tomate de serre infectée par le FORL

Traitements	Masse fraîche des fruits (Kg)	N ^{bre} de fruits
<i>G. monosporum</i>	10,4a*	64,2a
<i>G. mosseae</i>	10,5a	68,3a
Témoin inoculé	9,1b	57,6b
SE	0,26	1,9

*Une même lettre indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements selon le test de comparaisons multiples de Duncan ($P < 0,05$).
Adapté d'Utkhede (2006)

2.3.2.-Efficacité des agents antagonistes contre *Pythium* spp

Les oomycètes *Pythium* spp. constituent l'un des « complexes » d'agents pathogènes les plus redoutables responsables de pourritures de racines et de fonte des semis dans les cultures en serre (Jayaraj et al., 2007). Parmi les espèces isolées chez la tomate de serre, on trouve *Pythium ultimum* et *P. aphanidermatum* (Salman et Abuamsha, 2012 ; Hultberg et al., 2010 ; Gravel et al., 2005).

Beaucoup d'efforts ont été mis en œuvre pour lutter efficacement contre ces agents pathogènes chez la tomate de serre. Par exemple, une étude menée par Jayaraj et al. (2007) dans le but d'évaluer l'efficacité de la bactérie *Pseudomonas fluorescens* contre la fonte des semis causée par *P. aphanidermatum* était très révélatrice. La combinaison de cette souche bactérienne avec l'incorporation d'amendements organiques dans le sol a réduit considérablement l'incidence de la fonte des semis. L'incorporation de la matière organique dans le sol a contribué à l'augmentation de la population bactérienne de la rhizosphère. Trois années plus tard, Hultberg et al. (2010) ont effectué une étude pareille. Ils ont examiné, en système hydroponique, l'effet d'un biosurfactant produit par *Pseudomonas koreensis* dans la lutte contre *P. ultimum*. Les résultats obtenus ont concordé avec ceux de Jayaraj et al. (2007), en termes de potentialité de la lutte biologique des *Pseudomonas* contre le *P. aphanidermatum*. Avec l'utilisation du biosurfactant, l'incidence de la maladie provoquée par *P. ultimum* a été réduite de manière significative. Aucune différence significative n'a été obtenue entre les plants de tomate traités avec le biosurfactant et les plants sains que ce soit pour l'indice de la maladie ou la masse fraîche des racines, tandis que tous les plants infectés par l'agent pathogène ont significativement présenté les symptômes de la maladie (Tableau 7).

En 2006, Gravel et al. ont plus globalement mis en relief l'efficacité des micro-organismes antagonistes dans la répression de la pourriture pythienne chez la tomate de serre en culture hydroponique. Dans la laine de roche, quelques agents de lutte

testés ont réduit le taux d'infection par le *P. ultimum*. Les plants témoins infectés ont grandement présenté les symptômes de la maladie. La gravité de la maladie a été très forte (52,6%) comparée à celle du traitement témoin sain (11,6%). Les agents de lutte biologique ont fait montre d'une grande efficacité contre *P. ultimum* (Tableau 8). Les rendements commercialisables ont été aussi augmentés. Le nombre de fruits par plante a augmenté (Tableau 9). En rapport avec le rendement, aucune différence significative n'a été obtenue entre le traitement témoin sain et les autres, sauf pour le traitement témoin infecté. Les agents de lutte biologique ont probablement favorisé un meilleur ancrage du système racinaire, limité les dommages qui y ont été causés par *P. ultimum* (Gravel et al., 2006).

Tableau 7. Effets d'un biosurfactant produit par *Pseudomonas koreensis* sur le développement de la pourriture pythienne de la tomate de serre infectée par *Pythium ultimum*

Traitements	Masse fraîche des plants(g)	Masse fraîche des racines	Indice de la maladie
Témoin sain	5,52±0,54ab*	3,26±0,47a	0,38a
<i>P. ultimum</i> seul	4,94±0,83b	2,24±0,46b	2,25b
<i>P.ultimum</i> +Biosurfactant	6,36±0,67a	4,04±0,58a	0,50a

*Une même lettre dans une colonne indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements selon le test de comparaisons multiples de Duncan (P<0,05). Adapté de Hultberg et al. (2010)

Tableau 8. Effets de quelques agents de lutte biologique sur la pourriture racinaire de la tomate de serre causée par *Pythium ultimum*

Traitements	Gravité de la pourriture racinaire (%)	Réduction de la gravité de la maladie (%)
Témoin sain	11,6e*	-
<i>P.ultimum</i>	56,2a	0,0
<i>P. ultimum</i>+<i>Penicillium brevicompactum</i>	37,7b	32,9
<i>P. ultimum</i>+ <i>Penicillium solitum</i> souche 1	25,4bcde	54,8
<i>P. ultimum</i>+<i>Pseudomonas fluorescens</i>	13,7de	75,6
<i>P. ultimum</i>+<i>Pseudomonas fluorescens</i> G souche 2	17,9cde	68,2
<i>P. ultimum</i>+<i>Pseudomonas marginalis</i>	31,6bc	43,7
<i>P. ultimum</i>+<i>Pseudomonas putida</i> B souche 1	27,5bcd	51,1
<i>P. ultimum</i>+<i>Pseudomonas syringae</i> souche 1	12,5 ^e	77,8
<i>P. ultimum</i>+<i>Trichoderma atroviride</i>	27,9bcd	50,4

*Une même lettre dans une colonne indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements selon le test de Fisher ($P < 0,05$).
Adapté de Gravel et al. (2006)

Tableau 9. Effets de quelques agents de lutte biologique sur le rendement en fruits commercialisables de tomates de serre attaquées par *Pythium ultimum*

Traitements	Rendement (g/plante)	N ^{bre} de fruits/plante
Témoin sain	6003ab*	35,0ab
<i>P.ultimum</i>	5262c	33,3abc
<i>P.ultimum</i> + <i>Penicillium brevicompactum</i>	5991ab	32,3bc
<i>P.ultimum</i> + <i>Penicillium solitum</i> souche 1	6526a	35,8a
<i>P.ultimum</i> + <i>Pseudomonas fluorescens</i>	6406a	35,4ab
<i>P.ultimum</i> + <i>Pseudomonas fluorescens</i> G souche 2	5448bc	31,3c
<i>P.ultimum</i> + <i>Pseudomonas marginalis</i>	6453a	36,2a
<i>P.ultimum</i> + <i>Pseudomonas putida</i> B souche 1	6381a	35,7a
<i>P.ultimum</i> + <i>Pseudomonas syringae</i> souche 1	6345a	36,2a
<i>P.ultimum</i> + <i>Trichoderma atroviride</i>	6428a	36,0a

*Une même lettre dans une colonne indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements selon le test de Fisher ($P < 0,05$).

Adapté de Gravel et al. (2006)

2.3.3.-Efficacité des agents antagonistes contre *Pyrenochaeta lycopersici*

Les racines liégeuses causées par l'hyphomycète *Pyrenochaeta lycopersici* figurent parmi les maladies racinaires les plus désastreuses chez la tomate de serre biologique en sol. Pour lutter contre cette maladie, on a parfois recours à l'utilisation d'agents de lutte biologique. Les résultats de diverses études menées à cet effet témoignent de l'efficacité de ce moyen de lutte dans la répression de cette maladie. Parmi les agents de lutte biologique, les hyphomycètes *Trichoderma* spp et bactéries actinomycètes *Streptomyces* spp se sont révélés les plus efficaces (Fiume et Fiume, 2008).

Fiume et Fiume ont entrepris d'évaluer l'efficacité de la lutte biologique à la maladie les racines liégeuses de la tomate de serre. Ils ont, en conséquence, traité des plants de

tomate avec les souches *Bacillus subtilis* M51 P1, *Streptomyces* spp AtB42 et *Trichoderma viride* 18/ 17 SS, plants cultivés en plein sol inoculés par une suspension de conidies de *P. lycopersici*. Les agents antagonistes ont réprimé la maladie. Une grande différence significative a été obtenue entre les plants traités avec ces agents antagonistes et le traitement témoin (Tableau 10). Le *Trichoderma viride* 18/ 17 SS a présenté les meilleurs résultats. En effet, les souches de *Trichoderma* spp possèdent une excellente capacité à coloniser la rhizosphère (Vinale et al., 2008). Leur mécanisme d'action est notamment basé sur la compétition pour la niche écologique et les nutriments, et le parasitisme.

Fiume et Fiume (2008) ont obtenu ces résultats sous des conditions favorables au développement des agents antagonistes tels l'absence de salinité, la régularisation de l'irrigation, le maintien d'un pH neutre et l'enrichissement du milieu de culture. Avec ces conditions optimales, Fiume et Fiume n'ont fait que renforcer le potentiel de ces agents de lutte biologique. Ces conditions ont assuré l'augmentation de leur population, ce qui les rendait plus compétitifs. Cela a aussi été observé par Hasna et al. (2009). In vitro, ces chercheurs rapportent que ces agents antagonistes ont présenté une certaine inhibition de *P. lycopersici* dans un milieu riche en nutriment. En serre, c'était pareil. Plus le sol était enrichi, plus la capacité de ces agents de lutte biologique était renforcée.

Tableau 10. Valeurs de l'indice de McKinney (%) comparées de bactéries et hyphomycètes dans la lutte biologique à la maladie des racines liégeuses de la tomate de serre

Traitements	N ^{bre} de jours après transplantation		
	141	171	199
	Indice de McKinney (%)		
Témoin	40,0a*	53,3a	66,7a
<i>T. viride</i>	3,3c	13,3c	22,3c
<i>Streptomyces</i> spp	10,0b	16,7c	33,7c
<i>B. subtilis</i>	16,7b	30,0b	43,3b

*Une même lettre indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs des traitements selon le test de comparaisons multiples de Duncan ($p < 0,01$).

Adapté de Fiume et Fiume (2008)

Varela et al. (2009) ont aussi montré que ces agents de lutte biologique ne sont pas seulement impliqués dans la répression de la maladie des racines liégeuses de la tomate, mais ils sont aussi impliqués dans la croissance de la plante. Il y a une augmentation des rendements en fruits des plants de la tomate par l'application de préparations à base d'agents antagonistes « Biofongicides » (Tableau 11). Contrairement au traitement témoin, les plants traités avec des biofongicides dérivés de ces agents antagonistes ont présenté une augmentation de la masse fraîche des fruits, et une amélioration de la longueur des pousses et de la masse fraîche des pousses. L'amélioration de la production par les agents de lutte biologique est liée à la répression de l'agent pathogène.

Tableau 11. Efficacité de préparations commerciales (Standard) à base d'agents antagonistes sur la croissance de la tomate de serre

Traitements	Masse fraîche des fruits (g)	Longueur des pousses (cm)	Masse fraîche des pousses (g)
<i>Gliocladium catenulatum</i> standard (Prestop WP)	385±88a*	150±27a	340±36a
<i>Gliocladium</i> spp. standard (Gliomix)	331±122a	121±16b	237±82b
<i>Streptomyces griseoviridis</i> K61 (Mycostop)	298±117a	122±15b	245±37b
Témoin infecté	243±100b	119±14b	236±63b

*Les valeurs accompagnées d'une même lettre sont significativement différentes du traitement témoin infecté par l'agent pathogène et non traité avec les formulations commerciales. Les préparations sont des produits biologiques homologués. Les valeurs présentées sont des moyennes ± les écarts-types.

Tiré de Varela et al. (2009)

2.3.4.-Efficacité des agents antagonistes contre *Rhizoctonia solani*

Le mycélium stérile (Basidiomycète) *Rhizoctonia solani* est l'un des agents pathogènes responsables de la fonte des semis chez la tomate de serre. Cette maladie peut affecter les plants de tomate en pré-levée en post-levée. Quelques auteurs ont montré l'efficacité des agents de lutte biologique dans la répression du *R. solani*. Mezeal (2014) rapporte le potentiel de certaines souches bactériennes, entre autres *Pseudomonas fluorescens* et *Bacillus subtilis*, dans la réduction de l'incidence et de la gravité des fontes des semis causées par *R. solani*. Ces agents antagonistes agissent efficacement seuls, ou combinés. Appliqués seuls, *Pseudomonas fluorescens* et *B. subtilis* ont réduit considérablement la fonte de semis des plantules jusqu'à 10,8% et 17,1% respectivement, comparés au sol infecté par l'agent pathogène et sans agents

antagonistes (54%) (Mezeal, 2014). En combinaison, ces agents de lutte biologique ont amélioré l'efficacité de la lutte biologique (Tableau 12).

Tableau 12. Effets de *Pseudomonas fluorescens* et de *Bacillus subtilis* dans la réduction de la fonte des semis de tomate de serre causée par *Rhizoctonia solani*

Traitements	Incidence de la fonte des semis (%)	
	Pré-levée	Post-levée
Témoin sain	22,3	22,9
Témoin <i>R. solani</i> seul	54	42,3
<i>R. solani</i> + <i>P. fluorescens</i>	10,8	7,6
<i>R. solani</i> + <i>B. subtilis</i>	17,1	15,9
<i>R. solani</i> + <i>P. fluorescens</i> + <i>B. subtilis</i>	9,4	6,5
<i>L. S. D</i>	2,54	1,43

Adapté de Mezeal (2014)

Comme dans quelques études précédentes, les deux souches bactériennes exprimeraient leur antagonisme par la production de substances antibiotiques (Castillo et al., 2013 ; Santoyo et al., 2012) qui inhiberaient le développement du *R. solani*. De plus, quand ces agents antagonistes agissent en combinaison ils deviennent plus efficaces que lorsqu'ils sont utilisés individuellement. Solanki et al. (2012) expliquent le rôle des enzymes hydrolytiques dans la dégradation de la paroi cellulaire de *R. solani* ; ils ont mis en évidence quelques enzymes produites par des *Bacillus* spp. En utilisant les mycéliums de l'agent pathogène comme source de carbone, ils ont pu détecter plusieurs activités enzymatiques qui provoqueraient l'inhibition de l'agent pathogène.

Outre les agents antagonistes bactériens, les champignons antagonistes ont aussi fait leur preuve dans la répression de *R. solani*. On pourrait citer à juste titre l'hyphomycètes *Trichoderma harzianum*. Singh et al. (2014) ont montré que deux souches de *T. harzianum* (*Trichoderma harzianum* BHU-51 et *Trichoderma*

harzianum BHU-105) présentent un excellent pouvoir antagoniste contre *R. solani*. Le traitement des semences avec ces souches a non seulement favorisé leur germination, mais a aussi réduit de manière significative l'incidence de la maladie (fonte des semis) par rapport aux semences non traitées. L'effet était encore plus marqué lorsque ces agents de lutte biologique étaient utilisés en combinaison (Fig 3). Ces résultats s'accordent à nouveau avec l'idée selon laquelle les agents de lutte biologique peuvent être plus efficaces en combinaison que lorsqu'ils sont utilisés seuls.

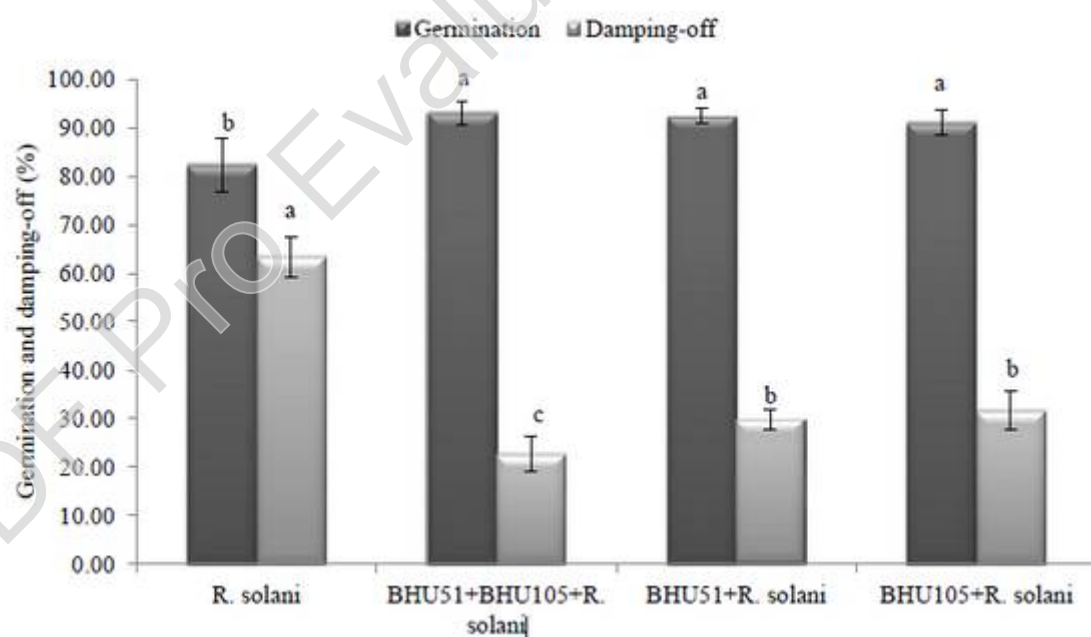


Figure 3. Effets de deux souches de *Trichoderma harzianum* sur la germination des semences et l'incidence de la fonte des semis de la tomate de serre causée par *R. solani*

Une même lettre indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements selon le test de comparaisons multiples de Duncan ($p < 0,05$).

Tirée de Singh et al. (2014)

III.-CONCLUSION

De toute évidence, l'industrie de la tomate de serre est très florissante au Canada. Sa valeur générée à la ferme ne cesse d'augmenter d'année en année. Toutefois, les conditions régnant à l'intérieur des serres favorisent le développement de plusieurs maladies racinaires causées par des champignons et oomycètes pathogènes. Les ascomycètes *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* et *Pyrenochaeta lycopersici*, les oomycètes *Pythium ultimum* et *P. aphanidermatum*, et le basidiomycète mycélium stérile *Rhizoctonia solani* sont entre autres quelques agents pathogènes qui ont été retenus dans le cadre de ce travail et qui causent d'énormes ravages au système racinaire de la tomate de serre.

Pour lutter efficacement contre ces agents pathogènes, la lutte chimique était entre autres adoptée. Mais, cette stratégie de lutte traîne derrière elle beaucoup de risques, dont la pollution de l'environnement et la dégradation de l'innocuité des aliments consommés. Vu les risques liés à ce moyen de lutte et du fait que les conditions en serre favorables au développement de ces agents pathogènes sont pratiquement les mêmes qui sont propices au développement des agents de lutte biologique, on a supposé que l'utilisation de ces agents de lutte biologique pourrait permettre de lutter efficacement contre les champignons et oomycètes de la tomate de serre.

La lecture et l'analyse d'une panoplie d'articles scientifiques portant sur des travaux réalisés ici (Canada) et ailleurs ont permis de découvrir quelques produits biologiques homologués, et quelques micro-organismes antagonistes de types fongiques et bactériens qui ont fait leur preuve dans la répression des maladies racinaires de la tomate de serre. Les bactéries *Bacillus subtilis* souche EU07 et *Pseudomonas putida* PCL1760 se sont montrées très efficaces contre le FORL. Ces agents de lutte biologique ont non seulement réduit l'incidence et la gravité de la fusariose des racines et du collet de la tomate de serre, mais ont aussi amélioré la croissance des plants de tomate. *Glomus monosporum* et *G. mosseae*, deux champignons

arbusculaires mycorhiziens, ont amélioré la production de fruits. *Pseudomonas fluorescens* et *P. syringae* souche 1, et l'hyphomycète *Trichoderma atroviride* ont à leur tour fourni de probants résultats tant dans la répression des fontes des semis causées par *Pythium ultimum* et *P. aphanidermatum* que dans l'amélioration de la production de fruits de la tomate de serre. Chez la tomate de serre biologique en sol, l'incidence et la gravité de la maladie des racines liégeuses ont été réduites par les activités du *Trichoderma viride* et de *Streptomyces* spp. Enfin, la littérature a fait ressortir l'efficacité du *Trichoderma harzianum* dans la réduction de fonte des semis causée par le mycélium stérile de *Rhizoctonia solani*.

À présent, il n'y a aucun risque de se tromper en affirmant que le recours à la lutte biologique par l'utilisation d'agents antagonistes pour contrer les champignons et oomycètes pathogènes de la tomate de serre est une avenue à préconiser en remplacement de la lutte chimique. À la lumière des données sus-mentionnées, l'hypothèse de départ peut donc être confirmée. L'utilisation d'agents de lutte biologique peut permettre de lutter efficacement contre des champignons et oomycètes pathogènes du système racinaire de la tomate de serre tout en gardant un rendement élevé. Cependant les recherches effectuées à cet effet doivent être plus poussées et plus appliquées ; elles doivent aller jusqu'au rendement. Très peu des articles explorés ont pris en compte la composante « rendement ». Les recherches ne doivent pas se limiter uniquement aux aspects épidémiologiques, le volet agronomique devrait être intégré davantage. Les recherches sur les biofongicides doivent aussi se poursuivre. Et dans le contexte d'une agriculture durable claironnée à l'heure actuelle, la lutte biologique s'impose comme une avenue viable et préférable à l'utilisation des fongicides chimiques de synthèse ; elle peut potentiellement remplacer l'usage de ces produits dans l'agriculture. Mais pour y parvenir, il conviendrait d'aborder plus exhaustivement toutes les problématiques relatives et d'inscrire les recherches dans une logique de fournir des aliments sains à toutes les communautés nationales.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdel-Kader, M. M., El-Mougy, N. S., et Lashin, M. D. A. 2012.** Different approaches of bio-control agents for controlling root rot incidence of some vegetables under greenhouse conditions. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 2(1), 115-127.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2013** (Page consultée le 10 février). *Aperçu statistique de l'industrie des légumes de serre du Canada pour 2013* [en ligne]. Adresse URL : <http://www.agr.gc.ca/fra/industrie-marches-et-commerce/statistiques-et-information-sur-les-marches/par-produit-secteur/horticulture/horticulture-industrie-canadienne/rapports-par-secteur/apercu-statistique-de-l-industrie-des-legumes-de-serre-du-canada-pour-2013/?id=1422647662232>
- Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2011** (Page consultée le 10 février). *Profil de la culture de la tomate de serre au Canada, 2011* [en ligne]. Adresse URL : http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/aac-aafc/A118-10-24-2013-fra.pdf
- Alabouvette, C., Lemanceau, P., et Steinberg, C. 1993.** Recent advances in the biological control of Fusarium wilts. *Pesticide Science*, 37(4), 365-373.
- Almaghrabi, O. A., Massoud, S. I., et Abdelmoneim, T. S. 2013.** Influence of inoculation with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on tomato plant growth and nematode reproduction under greenhouse conditions. *Saudi journal of biological sciences*, 20(1), 57-61.
- Baysal, Ö., Çalışkan, M., et Yeşilova, Ö. 2008.** An inhibitory effect of a new *Bacillus subtilis* strain (EU07) against *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 73(1), 25-32.
- Beneduzi, A., Ambrosini, A., et Passaglia, L. M. 2012.** Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genetics and molecular biology*, 35(4), 1044-1051.

- Benhamou, N., le Floch, G., Vallance, J., Gerbore, J., Grizard, D., et Rey, P. 2012.** *Pythium oligandrum*: an example of opportunistic success. *Microbiology*, 158(Pt 11), 2679-2694.
- Campbell, R. 1989.** *Biological control of microbial plant pathogens*. Cambridge University Press.
- Castillo, H. F., Aguilar, C., Reyes, C. F., Morales, G. G., et Herrera, R. R. 2013.** Biological control of root pathogens by plant-growth promoting *Bacillus spp.* INTECH Open Access Publisher.
- Chandel, S., Allan, E. J., et Woodward, S. 2010.** Biological control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* on tomato by *Brevibacillus brevis*. *Journal of phytopathology*, 158(7-8), 470-478.
- Compant, S., Duffy, B., Nowak, J., Clément, C., et Barka, E. A. 2005.** Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. *Applied and environmental microbiology*, 71(9), 4951-4959.
- Driesche, R.G. Van et T.S. Bellows Jr. 1996.** *Biological control*. New York, Chapman & Hall, 539p
- El-Mohamedy, R.S.R., Jabnoun-Khiareddine, H., et Daami-Remadi, M. 2014.** Control of root rot diseases of tomato plants caused by *Fusarium solani*, *Rhizoctonia solani* and *Sclerotium rolfsii* using different chemical plant resistance inducers. *Tunisian Journal of Plant Protection* 9: 45-55.
- Fiume, G., et Fiume, F. 2008.** Biological control of corky root in tomato. *Commun Agric Appl Biol Sci*, 73(2), 233-48.
- Gerbore, J., Benhamou, N., Vallance, J., Le Floch, G., Grizard, D., Regnault-Roger, C., et Rey, P. 2014.** Biological control of plant pathogens: advantages and limitations seen through the case study of *Pythium oligandrum*. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(7), 4847-4860.

- Gravel, V. 2007.** Lutte contre *Pythium ultimum* chez la tomate de serre: une approche microbienne. 138 p. Thèse (Ph. D), Faculté des Sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec.
- Gravel, V., Martinez, C., Antoun, H., et Tweddell, R. J. 2006.** Control of greenhouse tomato root rot [*Pythium ultimum*] in hydroponic systems, using plant-growth-promoting microorganisms. *Canadian journal of plant pathology*, 28(3), 475-483.
- Gravel, V., Martinez, C., Antoun, H., et Tweddell, R. J. 2005.** Antagonist microorganisms with the ability to control *Pythium* damping-off of tomato seeds in rockwool. *BioControl*, 50(5), 771-786.
- Handelsman, J., et Stabb, E. V. 1996.** Biocontrol of soilborne plant pathogens. *The plant cell*, 8(10), 1855.
- Hasna, M. K., Ögren, E., Persson, P., Mårtensson, A., et Rämert, B. 2009.** Management of corky root disease of tomato in participation with organic tomato growers. *Crop Protection*, 28(2), 155-161.
- Hultberg, M., Alsberg, T., Khalil, S., et Alsanius, B. 2010.** Suppression of disease in tomato infected by *Pythium ultimum* with a biosurfactant produced by *Pseudomonas koreensis*. *BioControl*, 55(3), 435-444.
- Hyakumachi, M. 2013.** Research on biological control of plant diseases: present state and perspectives. *Journal of General Plant Pathology*, 79(6), 435-440.
- Institut de la Statistique du Québec. 2014** (Page consultée le 12 février). *Profil sectoriel de l'industrie bioalimentaire au Québec, 2014* [en ligne]. Adresse URL : <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/profil-industrie-bioalimentaire.html>
- Jacques, P., Delfosse, P., Ongena, M., Lepoivre, P., Cornélis, P., Koedam, N., et Thonart, P. 1993.** Les mécanismes biochimiques développés par les *Pseudomonas fluorescens* dans la lutte biologique contre les maladies des plantes transmises par le sol. *Cahiers Agricultures*, 2(5), 301-307.
- Jarvis, W. R. 1988.** Fusarium crown and root rot of tomatoes. *Phytoprotection*,

69 (2), 49-64

- Jayaraj, J., Parthasarathi, T., et Radhakrishnan, N. V. 2007.** Characterization of a *Pseudomonas fluorescens* strain from tomato rhizosphere and its use for integrated management of tomato damping-off. *BioControl*, 52(5), 683-702.
- Khalil, S., et Alsanius, B. W. 2010.** Evaluation of biocontrol agents for managing root diseases on hydroponically grown tomato. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 117(5), 214.
- Larkin, R. P., et Fravel, D. R. 1998.** Efficacy of various fungal and bacterial biocontrol organisms for control of Fusarium wilt of tomato. *Plant disease*, 82(9), 1022-1028.
- Lee, K. J., Oh. B. T. et Serelathan, K. K. 2013.** Advances in Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Biological Control of Plant Diseases. Dans *Bacteria in Agrobiolgy: Disease Management*. Maheshwari, D.K. (éd). Springer Heidelberg New York Dordrecht London, p. 1-13.
- Lefort, F. 2010** (Page consultée le 22 avril). Lutte biologique et lutte microbiologique: des concepts anciens pour des méthodes de lutte modernes ? [en ligne]. Adresse URL : http://acl-lullier.ch/pdf_conf_10_1/04_LEFORT.pdf
- McGovern, R. J. 2015.** Management of tomato diseases caused by *Fusarium oxysporum*. *Crop Protection* / DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.021>
- Mezeal, A., I. 2014.** Study biocontrol efficacy of *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis* against *Rhizoctonia solani* and *Fusarium oxysporum* causing disease in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences ISSN: 2231-6345 (Online) An Open Access, Online International Journal Available at <http://www.cibtech.org/jls.htm> 2014 Vol. 4 (4) October-December, pp.175-183/Mezeal*

- Moorman, G. W. 2011.** Biological Control in Greenhouses. *Agronomie*, 21, 351-366.
- Pal, K. K., et Gardener, B. M. 2006.** Biological control of plant pathogens. *The plant health instructor*, 2, 1117-1142.
- Paulitz, T. C., et Bélanger, R. R. 2001.** Biological control in greenhouse systems. *Annual review of phytopathology*, 39(1), 103-133.
- Postma, J., Clematis, F., Nijhuis, E. H., et Someus, E. 2013.** Efficacy of four phosphate-mobilizing bacteria applied with an animal bone charcoal formulation in controlling *Pythium aphanidermatum* and *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* in tomato. *Biological Control*, 67(2), 284-291.
- Puopolo, G., Aida, R. A. I. O., Pierson, L., et Zoina, A. 2011.** Selection of a new *Pseudomonas chlororaphis* strain for the biological control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*. *Phytopathologia Mediterranea*, 50(2), 228-235.
- Réseau d'Avertissements Phytosanitaires. 2014** (Page consultée le 3 avril). *Spécial Phytoprotection Bio* [en ligne]. Adresse URL : <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap/documents/b03gen14.pdf>
- Saidi, N., Kouki, S., M'Hiri, F., Hajlaoui, M. R., Mahrouk, M., Ouzari, H., et Hassen, A. 2009.** Characterization and selection of *Bacillus* sp. strains, effective biocontrol agents against *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*, the causal agent of Fusarium crown and root rot in tomato. *Annals of microbiology*, 59(2), 191-198.
- Salman, M., et Abuamsha, R. 2012.** Potential for integrated biological and chemical control of damping-off disease caused by *Pythium ultimum* in tomato. *BioControl*, 57(5), 711-718.
- Santoyo, G., Orozco-Mosqueda, M. D. C., et Govindappa, M. 2012.** Mechanisms of biocontrol and plant growth-promoting activity in soil bacterial species of

Bacillus and *Pseudomonas*: a review. *Biocontrol Science and Technology*, 22(8), 855-872.

- Shanmugam, V., et Kanoujia, N. 2011.** Biological management of vascular wilt of tomato caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* by plant growth-promoting rhizobacterial mixture. *Biological control*, 57(2), 85-93.
- Singh, S. P., Singh, H. B., Singh, D. K., et Rakshit, A. 2014.** Trichoderma-mediated enhancement of nutrient uptake and reduction in incidence of *Rhizoctonia solani* in tomato. *Egyptian Journal of Biology*, 16(1), 29-38.
- Solanki, M. K., Robert, A. S., Singh, R. K., Kumar, S., Pandey, A. K., Srivastava, A. K., et Arora, D. K. 2012.** Characterization of mycolytic enzymes of *Bacillus* strains and their bio-protection role against *Rhizoctonia solani* in tomato. *Current microbiology*, 65(3), 330-336.
- Statistique Canada. 2011** (Page consultée le 10 février). *Les industries des cultures de serre, des gazonières et des pépinières, 2011* [en ligne]. Adresse URL : <http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-arbresdenoel/documents/22-202-x2011000-fra.pdf>
- Suprapta, D. N. 2012.** Potential of microbial antagonists as biocontrol agents against plant fungal pathogens. *J ISSAAS*, 18(2), 1-8.
- Szczechura, W., Staniaszek, M., et Habdas, H. 2013.** *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*—the Cause of Fusarium Crown and Root Rot in Tomato Cultivation. *Journal of plant protection research*, 53(2), 172-176.
- Utkhede, R. (2006).** Increased growth and yield of hydroponically grown greenhouse tomato plants inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*. *Biocontrol*, 51(3), 393-400.
- Validov, S. Z., Kamilova, F., et Lugtenberg, B. J. 2009.** *Pseudomonas putida* strain PCL1760 controls tomato foot and root rot in stonewool under industrial conditions in a certified greenhouse. *Biological Control*, 48(1), 6-11.

- Varela, A. R., Rämert, B., et Mårtensson, A. 2009.** Potential use of biocontrol agents for control of *Pyrenochaeta lycopersici* in tomato crops. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B–Soil and Plant Science*, 59(4), 379-384.
- Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E. L., Marra, R., Woo, S. L., et Lorito, M. 2008.** Trichoderma–plant–pathogen interactions. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(1), 1-10.
- Vitale, A., Castello, I., Cascone, G., D'Emilio, A., Mazzarella, R., et Polizzi, G. 2011.** Reduction of corky root infections on greenhouse tomato crops by soil solarization in South Italy. *Plant Disease*, 95(2), 195-201.
- Vos, C. M., Yang, Y., De Coninck, B., et Cammue, B. P. A. 2014.** Fungal (-like) biocontrol organisms in tomato disease control. *Biological control*, 74, 65-81.
- Weller, D. M., Raaijmakers, J. M., Gardener, B. B. M., et Thomashow, L. S. 2002.** Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens 1. *Annual review of phytopathology*, 40(1), 309-348.
- Whipps, J. M. 2001.** Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. *Journal of experimental Botany*, 52(suppl 1), 487-511.
- Xu, X. M., Jeffries, P., Pautasso, M., et Jeger, M. J. 2011.** Combined use of biocontrol agents to manage plant diseases in theory and practice. *Phytopathology*, 101(9), 1024-1031.
- Zhang, L., Khabbaz, S. E., Wang, A., Li, H., et Abbasi, P. A. 2015.** Detection and characterization of broad-spectrum antipathogen activity of novel rhizobacterial isolates and suppression of Fusarium crown and root rot disease of tomato. *Journal of applied microbiology*, 118 (3), 685-703/doi.10.1111/jam.12720

Ouvrages consultés

Agrios, G.N. 2005. Plant Pathology. 5e édition. Elsevier Academic Press, Burlington, Ma.922p.

Blancard, D. 2009. Les maladies de la tomate : identifier, connaître, maîtriser. Editions Quae. Versailles.679p.

Jarvis, W.R. 1992. Managing diseases in greenhouse crops. APS Press, St. Paul. 288 p.

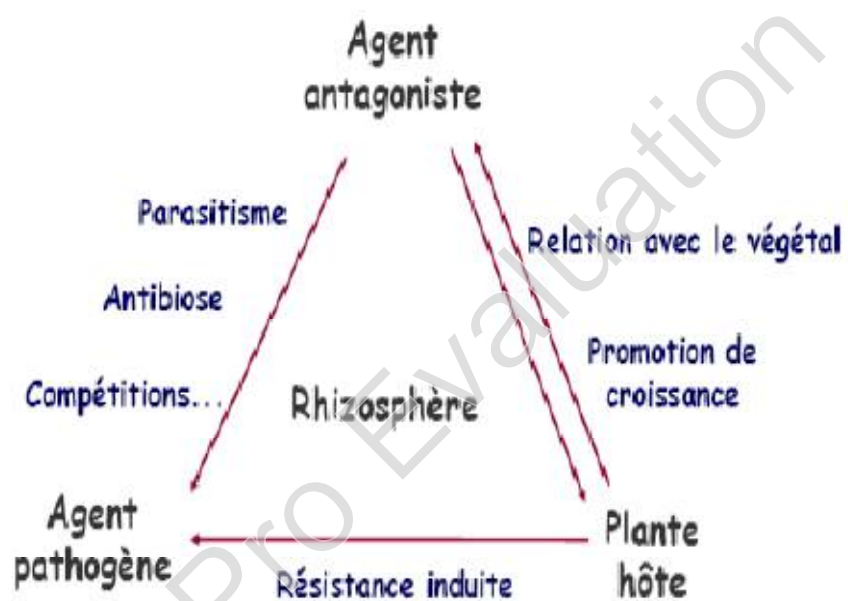
Richard, C. et Boivin, G. 1994. Maladies et ravageurs des cultures légumières au Canada. Société canadienne de phytopathologie et Société d'entomologie du Canada, Ottawa On. 590 p.

Roberts, D.A., et Boothroyd, C.W. 1984. Fundamentals of plant pathology. 3^e édition. W.H. Freeman and Co., New York NY. p. 432.

IV-ANNEXES

ANNEXE 1

Modes d'action des agents de lutte biologique

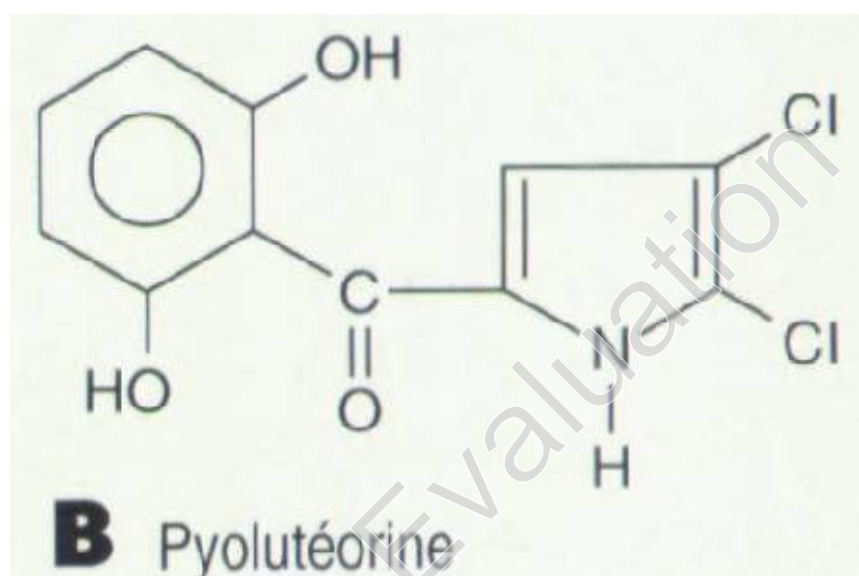


Source : François (2010)

http://acl-lullier.ch/pdf_conf_10_1/04_LEFORT.pdf

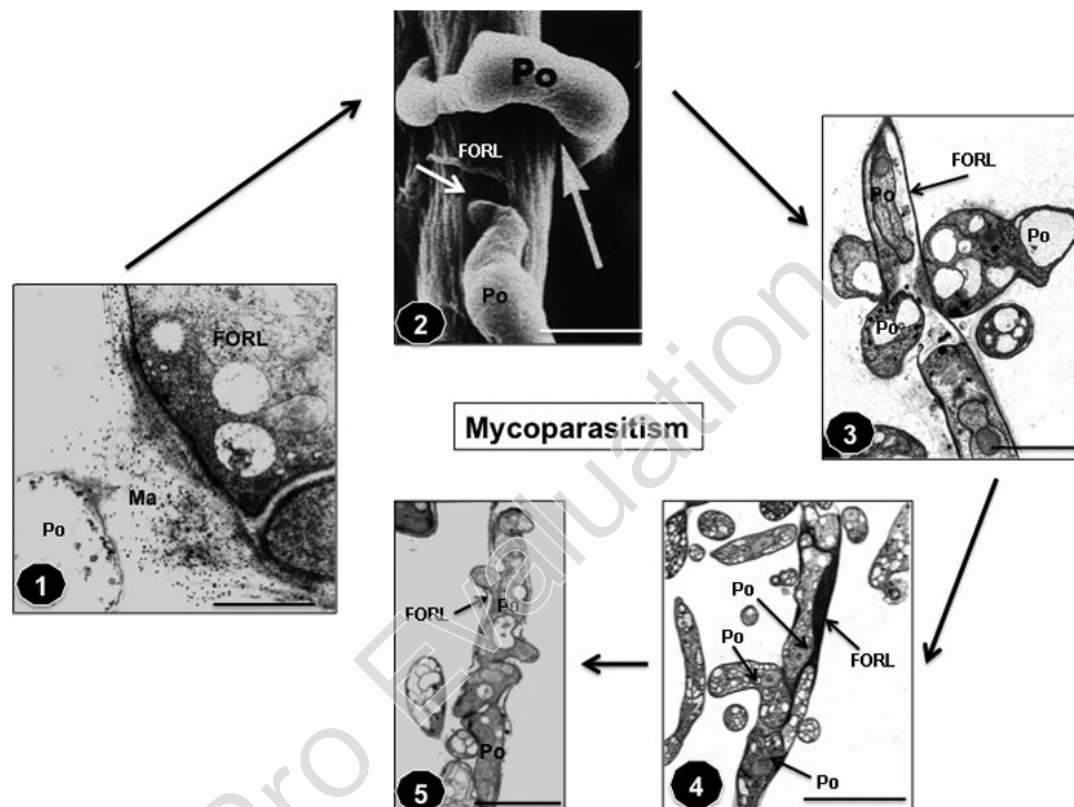
ANNEXE 2

Structure moléculaire de la Pyolutérine



Source : Jacques et al. (1993)

ANNEXE 3

Illustration du mycoparasitisme de FORL par *Pythium oligandrum*

Source : Benhamou et al. (2012)

PDF Pro Evaluation