

## L'utilisation des bactéries " PGPR " dans la lutte biologique contre les agents pathogènes des plantes cultivées

Achbani EH.<sup>1</sup>, Azba K.<sup>1</sup> et Samson R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Phytobactériologie, INRA/ ENA, BP. S/40 Meknès, Maroc

<sup>2</sup>INRA, Station de Phytobactériologie, 49071 Beaucozé cedex, France

### Résumé

*Outre les traitements chimiques contre les agents pathogènes et l'utilisation de variétés résistantes, qui constituent les deux pratiques les plus utilisées pour contrarier les maladies, mais qui présentent des effets induits connus, il y a lieu de considérer les voies de lutte biologique qui s'intéressent au contrôle des interactions entre les agents pathogènes et les facteurs biotiques et abiotiques de la rhizosphère.*

*Cette synthèse bibliographique concerne l'étude des relations qui s'établissent entre les antagonistes de la rhizosphère et les agents pathogènes via six différents modèles bactériens qui sont les genres *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Agrobacterium*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Clavibacter* et *Corynebacterium*. La nature de ces relations s'apparente surtout à la compétition nutritive observée entre autres avec les *Fusarium* spp., l'antibiose exercée au niveau de plusieurs couples hôte-pathogène et l'induction de la résistance systémique rencontrée par exemple dans le cas des fusarioses du concombre et du radis.*

**Mots clé :** Rhizosphère, compétition, antibiose, bactérie, pathogènes

### **Abstract : Biological control of plant pathogens with bacteria " PGPR "**

*In addition to the chemical treatment against the pathogenic agents and the use of resistant varieties, which constitute the two practical ones the most used to oppose the diseases, but which present known induced effects, it is necessary to consider the biological control ways which are interested in controlling interactions between pathogens and the biotic and abiotic factors of the rhizosphere. This bibliographical synthesis relates to the study of the relations which are established between the antagonistic bacteria of the rhizosphere and the pa-*

thogenic agents via six various bacterial models which are *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Agrobacterium*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Clavibacter* et *Corynebacterium*. The nature of these relations are related especially to the nutritive competition observed inter alia with *Fusarium* spp. the antibiose exerted on the level of several couples host-pathogenic and the induction of the systemic resistance met for example in the case of *Fusarium* wilts of cucumber and radish.

**Key Words :** Pathogens, antagonist bacterial, competition, antibiosis

## ملخص : استعمال بكتيريا من نوع "PGPR" في مكافحة الحيوية ضد أمراض النبات

أشبانجي أ.1، أزيي ك.1 و سامسون ر.2

<sup>1</sup> مختبر أمراض النبات من أصل بكتيري المركز الجهوي للبحث الزراعي/الدراسة الوطنية الفلاحية، ص.ب. 40 مكناس

<sup>2</sup> محطة أمراض النبات من أصل بكتيريا، المعهد الوطني للبحث الزراعي 49071 وكوزي سديكس فرنسا

من أجل مكافحة ممرضتي النباتات، يتم اللجوء إلى الأدوية الكيماوية والأصناف المقاومة، القناتين الأكثر استعمالا في الظروف الحالية ولكن نتيجة بغض الآثار السلبية الناتجة عنهما، تميل الأطروحة الحالية إلى الاهتمام بالمكافحة الحيوية نظرا لمزاياها الكثيرة وتهتم هذه المكافحة بمراقبة التفاعلية بين الممرضين وعناصر الحيوية ولا الحيوية المتواجدة في محيط جذور النبات. ولقد حاولنا في هذه الدراسة المرجعية استخراج العلاقات التي يمكن ان تنشأ بين الجراثيم المضادة القاطنة في محيط الجذور و الممرضين عبر ست نماذج مختلفة من البكتيريا التالية: البسودوموناس *Pseudomonas* والباسيلس *Baillus* والأكروباكتيريوم *Agrobacterium* والأنترياكتيريا *Anterobacter* و الإروينيا *Erwinia* والكلفيكتيريا *Clavibacter*.

أما طبيعة هذه العلاقات فتصب أساسا في كل من التنافس من أجل التغذية التي تشاهد مثلا مع أنواع الفيزاريوم *Fusarium*، والتضاد الحيوي الذي يظهر عند كثير من مجموعات «عائل-ممرض» وأخيرا في التحريض على المقاومة الجهازية كالتي سجلت بالنسبة لمرض الذبول "Fusariose" عند الخيار و الفجل.

**الكلمات المفتاحية:** البكتيريا، الممرضون، مكافحة الحيوية، التنافس، التضاد الحيوي، محيط الجذور

## Introduction

De nos jours, l'homme est contraint d'augmenter la production des denrées agricoles pour pouvoir subvenir à ses besoins.

Par ailleurs, l'augmentation de la production d'une culture donnée est liée à l'amélioration des techniques culturales, en particulier, à l'utilisation des cultivars de plus en plus productifs. Néanmoins, ces cultures sont souvent sujettes aux attaques parasitaires que l'homme est forcé de maintenir en dessous du seuil de nuisibilité pour vivre.

En outre, l'augmentation de la productivité et des échanges internationaux engendrent l'aggravation et l'apparition de certaines maladies, d'où la nécessité d'une application des pesticides qui pose elle même le problème des résidus et la pollution de l'environnement. La voie génétique offre des perspectives intéressantes sur le plan pratique, mais elle se heurte aux risques d'apparition des gènes résistants chez le pathogène.

Pour toutes ces raisons, les recherches vont bon train vers une perspective de lutte biologique qui repose sur l'application d'inoculum microbien, qui va s'ajouter aux autres voies précitées dans l'optique d'établir une stratégie de lutte raisonnée contre les maladies.

Des réalisations prometteuses en matière de lutte biologique ont vu le jour surtout après le succès obtenu avec certains agents telluriques antagonistes notamment les *Pseudomonas* spp fluorescents, les *Bacillus* spp et les *Agrobacterium* sp. contre les agents pathogènes responsables des maladies d'origine tellurique : *Agrobacterium radiobacter* var *radiobacter*, *Erwinia* spp, *Fusarium* spp, *Gaeumannomyces graminis* var *tritici*, *Rhizoctonia solani* et *Pythium ultimum*.

Le présent travail bibliographique faisant la synthèse d'une centaine d'articles cherche à défricher l'habitat de la rhizosphère en étudiant les modalités d'affrontement entre les antagonistes et les agents pathogènes, la détermination de leur activité fongistatique ou bactériostatique via l'étude de six différents modèles bactériens antagonistes qui sont : les *Pseudomonas*, les *Bacillus*, les *Agrobacterium*, les *Enterobacter*, les *Erwinia*, les *Clavibacter* et *Corynebacterium*. L'étude des différents antagonismes rencontrés ainsi que des mécanismes d'action des bactéries antagonistes est jugée intéressante comme préambule avant de s'intéresser à ces modèles.

## Les bactéries promotrices de la croissance et du développement des plantes

Dans la rhizosphère, trois catégories de micro-organismes se distinguent d'après Davet (1996): Les indifférents, les pernecieux et les stimulateurs de croissance. La finalité de ces derniers est d'augmenter le rendement des cultures et seules certaines rhizobactéries peuvent présenter cette capacité (Weller, 1988). Elles sont appelées "Plant Growth Promoting Rhizobacteria" par Kloepper et Schroth (1978) et désignées communément par le sigle "PGPR". Les plus étudiées d'entre elles sont : *Pseudomonas* fluorescents, *Bacillus* spp et *Agrobacterium radiobacter* (Lcong, 1986; Loper et Bayer, 1991). L'augmentation de rendement des cultures est la résultante de deux effets bénéfiques principaux :

## Etude des différents modèles

### *Pseudomonas* fluorescents

□ **Les Fusarioses** : certaines souches de *Fusarium oxysporum* (Schlecht) Snyder et Hansen sont des agents de trachéomycoses qui, avant d'attaquer le système racinaire de leur hôte, mènent une vie saprophytique dans le sol (Alabouvette et al., 1980).

Les mécanismes de lutte biologique contre la fusariose sont complexes. Plusieurs études menées ont mis le point sur l'usage des *Fusarium* non pathogènes (*F. oxysporum*) et de certaines bactéries dans le contrôle du *Fusarium* parasite (Kroon et al., 1991 ; Alabouvette et al., 1993).

Scher et Baker (1982) et Dupler et Baker (1984) travaillant respectivement dans les sols résistants de Salinas Valley en Californie, ont montré que des *Pseudomonas putida* ajoutés à un sol infesté, arrêtent les attaques des fusarioses du lin, du radis et du concombre. Tamietti et Alabouvette (1986) ont montré que la présence de *Fusarium* non pathogènes antagonistes et des *P. fluorescents* rendent le sol de l'île de Noirmontier (France) résistant aux Fusarioses du lin, du melon, de la tomate et de l'oeillet. De même, Yuen et al. (1985) ont conclu que *P. putida* et *P. alcaligenes* réduisent respectivement chez l'oeillet la sévérité du flétrissement dû au *F. oxysporum* f.sp. *dianthi* de 30% et de 40 %. Ainsi, Axelrood et Radley (1991) ont montré que 96 souches de PGPR inhibent *in vitro* le *Fusarium* isolé de pin douglas dans les régions forestières en Colombie Britannique (Canada).

Concernant les mécanismes d'action, les recherches menées en France dans les sols de Châteaurenard résistants permettent de montrer que les mécanismes sont basés sur des phénomènes de compétition (Louvét et al., 1976 ; Alabouvette et al., 1985). De même Scher et Baker (1982) et Lemanceau et al., (1993) ont montré que la réduction de la croissance des tubes germinatifs des pathogènes est due à la compétition pour le Fer ferrique. Les pyoverdines des *Pseudomonas* fluorescents (Meyer et Alabouvette, 1978) forment, avec le Fer, des complexes beaucoup plus stables que les sidérophores produits par les *Fusarium* (fusarinines). Le Fer chélaté par les pyoverdines est alors indispensable pour le pathogène.

Un autre mécanisme dans le contrôle des fusarioses est l'induction de la résistance systémique. En effet, Gessler et Kuc (1982) rapportent que la résistance systémique contre *F. oxysporum* f. sp. *cucumerinum* peut être induite par la préinfection des premières feuilles par *Colletotrichum orbicular* ou par le virus de la nécrose du tabac. De même, l'inoculation préalable avec un *F. oxysporum* non pathogène induit une résistance localisée ou systémique contre la fusariose du melon (Biles et Martyn, 1989), du concombre (Paulitz et al., 1987), de la tomate (Wymore et Baker, 1982 ; Duiff et al., 1998), de la pastèque (Larkin et al., 1996) et de l'oeillet (Lemanceau et al., 1992). Lemanceau et al. (1992) ont montré que la combinaison de la souche FO47b10 de *F. oxysporum* non pathogène et la souche WCS358 de *P. putida* est très efficace dans la suppression de la fusariose de l'oeillet sous serre. De même, Lemanceau et al. (1993) ont montré que la Pseudobactine 358 augmente l'intensité d'antagonisme de *F. oxysporum* (FO47b10) non pathogène contre *F. oxysporum* pathogène (WCS816) à travers une compétition pour le glucose.

Leeman et al. (1996), en travaillant sur des mutants déficients en pyoverdine des souches WCS 374 et WCS 417 de *P. fluorescens* montrent que ces bactéries induisent un certain niveau de résistance systémique à la fusariose du radis.

De leur côté, Duijff et al. (1998) ont montré que la fusariose de la tomate a été réduite suite à une co-inoculation avec la souche WCS417 de *Pseudomonas fluorescens* et *F. oxysporum* FO47 non pathogène sous des conditions contrôlées. La séparation spatiale du pathogène et des agents antagonistes exclut toute possibilité d'antagonisme et appuie le rôle d'ISR. Cette ISR a toujours été associée à la synthèse de PR-protéine. Ainsi que, la synthèse de pyoverdine provoque une réduction de la densité et de l'activité du pathogène dans la rhizosphère comme cela a été démontré lorsque *P. putida* WCS358 est co-inoculée avec la souche de *F. oxysporum* non pathogène (Duijff et al., 1999).

Il est à noter au passage que l'efficacité de ces micro-organismes antagonistes est dépendante d'autres facteurs d'ordre abiotique tels que la texture du sol, le potentiel hydrique et le pH. Tamietti et Alabouvette (1986), ont montré, par exemple, que le sol de Noirmoutier qui possède un niveau très élevé de résistance, est un sol sableux.

□ **Le Piétin échaudage** : la maladie connue par "piétin échaudage" (PE) du blé (*Triticum aestivum* L.) causée par *Gaeumannomyces graminis* (Sacc) Oliver et Von Arx var *tritici* Walker (anciennement dénommée: *Ophiobolus graminis* var *tritici*) est la maladie des céréales la plus importante à travers le monde (Weller et Cook, 1983). Elle peut être contrôlée soit par la rotation des cultures soit par la monoculture du blé qui rend le sol "suppressif" du piétin échaudage (Shipton, 1975).

Néanmoins, les agriculteurs ne peuvent pas pratiquer indéfiniment la monoculture, ni réaliser des rotations adéquates avec d'autres cultures (Weller et Cook, 1983), une autre voie donc vise à chercher au niveau du sol, des agents responsables de la suppression de piétin échaudage.

Cook et Rovira (1976) ont évoqué le rôle de *Pseudomonas fluorescens* dans la résistance durable des sols. Smiley (1979) et Weller et Cook, (1981) ont montré que les populations des *Pseudomonas fluorescens* producteurs d'antibiotiques, sont très élevées dans un sol résistant au P.E.. Rovira et Wildermuth (1981) ont constaté qu'au microscope, une prolifération de bactéries envahit les lésions provoquées par *G. graminis* var *tritici* (in Weller et Cook, 1983). Sivasithamparam et Parker (1978) (in Weller et Cook, 1983) ont empêché la maladie de s'exprimer, en trempant les racines de plantules de blé dans une suspension contenant un mélange de *Pseudomonas fluorescens*, avant d'être plantées dans un sol infesté avec *G. graminis* var *tritici*. De même que la bactérisation des semences du blé avec *P. putida* (K11) et *P. fluorescens* a diminué significativement les symptômes de la maladie dans les racines (Vrang et al., 1981) (in Weller et Cook, 1983).

Une augmentation du rendement de plus de 27% a été obtenue par Weller et Cook (1983) avec deux souches de *Pseudomonas fluorescens* (seules ou en combinaison) dans le sol résistant à la maladie.

Les antibiotiques qui inhibent fortement *G. graminis* var *tritici* *in vitro* ont été détectés au champ dans la rhizosphère du blé à des concentrations proches du seuil d'activité dans les sols résistants (Raaijmakers et al., 1998).

□ **Fontes de semis / Pourriture** : les attaques des semences et des plantules par des *Pythium* et des *Rhizoctonia* sont parfois très graves. Ces champignons sont des micro-organismes telluriques peu spécifiques (pois, radis, concombre, luzerne, coton, tomate...) (Hubband et al., 1983).

Les travaux réalisés depuis la fin des années 70 sur les bactéries de la rhizosphère ont montré que des *Pseudomonas fluorescens* peuvent assurer une bonne protection du coton contre *Pythium* comparable à celle d'un traitement au métalaxyl (Loper, 1988). Howell et Stiponovic (1980) ont montré qu'une souche de *Pseudomonas fluorescens* isolée du sol cultivé par le coton, produit deux types d'antibiotiques : la pyolutéorine inhibant *P. ultimum* (augmentation de la survie des plantules de 33 à 65%) et la pyrrolnitrine contre *R. solani* (28 à 71%). Selon Corbaz (1990) et Kloepper (1991), le traitement des semences par la souche Pf-5 réduit les attaques de *R. solani* et de la fonte de semis (*Pythium*) de 72% à 29% alors que l'antibiotique provoque une diminution de 67% à 35%. Cette même souche protège également le concombre via la production de métabolites antifongiques : sidérophores (pyoverdine), antibiotiques (pyolutéorine, pyrrolnitrine, cyanure et un composé non caractérisé nommé "antibiotique 3") (Kraus et Loper, 1992).

Rankin et Paulitz (1994) ont montré que deux souches de *P. corrugata* (Pc13 et Pc35) et trois de *Pseudomonas fluorescens* (Pf15, Pf16 et Pf17) réduisent la pourriture racinaire du concombre causée par *Pythium aphanidermatum* en culture hydroponique. De même, la pourriture racinaire du blé a été contrôlée par des *Pseudomonas fluorescens* (Becker et al., 1982) et celle du petit pois par *P. cepacia* (souche AMMD) et *Pseudomonas fluorescens* (souche PRA25) (Parke et al., 1991 ; King et Parke, 1993).

Sur tomate, et dans des conditions limitantes en fer, la souche 7NSK2 de *P. aeruginosa* s'est avérée efficace contre *Pythium splendens* grâce à la production de sidérophores (Buysens et al., 1996). De même, une souche de *Pseudomonas fluorescens* (F113) protège la betterave sucrière contre la pourriture racinaire causée par *Pythium* à travers la production de métabolites secondaires antifongiques tel que 2,4-diacétylphloroglucinol (Dunne et al., 1998).

Bagnasco et al. (1998), ont montré que les souches UP61, UP143 et UP148 de *Pseudomonas fluorescens* isolées de la rhizosphère de *Lotus corniculatus* sont inhibitrices de *P. ultimum* et *R. solani* responsables des fontes de semis par la production d'HCN et de sidérophores.

□ **La pourriture bactérienne à *Erwinia*** : la pourriture molle et la jambe noire de la pomme de terre sont causées par *E. carotovora* subsp. *carotovora* (E.c.c) et *E. carotovora* subsp. *atroseptica* (E.c.a). La première bactérie attaque la pomme de terre en climat tempéré (Elphinstone, 1987) et a été signalée sur tournesol en Mexique et sur la betterave sucrière aux USA (Hooker, 1981). La deuxième attaque également la pomme de terre et plusieurs fruits et végétaux. Les symptômes de ces deux bactéries sont les mêmes sur feuilles (nanisme, jaunissement avec enroulement typique vers le haut), sur tiges (pourriture marron-foncé à noir à la base avec un dessèchement par temps sec et une décoloration brun-noir du système vasculaire) et sur les tubercules (taches diffuses, huileuses autour des lenticelles de couleur marron avec un point au centre). Les symptômes sur tubercules se terminent par une pourriture molle ou pourriture sèche lenticellaire. Au champ, la semence malade pourrit complètement avant la germination entraînant des fontes de semis (Achbani et al., 1993a).

Kloepper et Schroth (1981) ont montré que la colonisation des racines de la pomme de terre par les PGPR réduit les populations d'*E. carotovora* sur les racines et les tubercules fils. Dans l'étude menée par Colyer et Mount (1984), la bactérisation de pré-semis des semences de pomme de terre et celle de post-récolte des tubercules avec les isolats de *P. putida* réduisent les symptômes respectivement de 50% et de 75 %. Des résultats similaires ont été obtenus par des souches de *Pseudomonas fluorescens* (1-13, B-10) (Rhodes et Logan, 1986).

Les dégâts d'*E. amylovora* responsable du feu bactérien (dessèchement apical des fleurs, feuilles et rameaux) sont limités dans le cas du poirier par un traitement avec la souche A506 de *Pseudomonas fluorescens* et la souche C9-15 d'*E. herbicola* (Lindow et al., 1996). Le mélange des deux souches précédentes pourrait réduire l'incidence de la maladie en moyenne de 60% (Stockwell et al., 1996).

Au champ, les travaux menés par Johnson et al. (1993) et Stockwell et al. (1996) sur deux bactéries antagonistes d'*E. carotovora*, la souche A 506 de *P. fluorescens* et un mutant de la souche C9-1 (C9-1S) d'*E. herbicola* résistant à la streptomycine, montrent que leurs populations épiphytes sur les fleurs de poirier entraînent un antagonisme efficace contre le feu bactérien. Le mécanisme d'action d'*E. herbicola* serait lié à la synthèse d'antibiotiques (Stockwell et al., 1996). En effet, la souche C9-1 produit, sur un milieu contenant D-glucose ou L-asparagine, deux antibiotiques nommés "Herbicolin 0 et Herbicolin 1". Ces deux antibiotiques (partiellement purifiés) entraînent une réduction significative de la sévérité du feu bactérien du poirier. L'herbicolin 0 inhibe la croissance des souches sauvages d'un nombre limité de procaryotes (la souche 110 d'*E. amylovora*, d'autres *Erwinia*, *Enterobacter aerogenes*, *Escherichia coli*, *Serratia marcescens* et *Bacillus cereus*) alors que, l'herbicolin 1 présente un spectre antibactérien très limité.

□ **Pourriture de post-récolte** : les deux maladies importantes de post-récolte des cultures fruitières sont la moisissure bleue causée par *Penicillium expansum* et la moisissure grise causée par *Botrytis cinerea* (Shoberg et Haag, 1996). Les agrumes sont également attaqués par les deux pourritures, verte et bleue, dues respectivement à *Penicillium digitatum* et à *Penicillium italicum* (Eckert et Eaks, 1989 in Smilanick et al., 1996).

Certaines espèces de *Pseudomonas fluorescens* peuvent être appliquées aux fruits après la récolte afin de réduire l'incidence des moisissures. Les agents de lutte biologique, incluant les souches de *P. syringae*, occupent les blessures des fruits de citrus et réduisent la gravité de cette maladie (Smilanick et al., 1995). Aux Etats-Unis, la souche 182 de *Candida oleophila* et les souches ESC-10 et ESC-11 de *P. syringae* sont commercialisées comme biofongicides de post-récolte (Kohl et al., 1995).

□ **Taches annulaires "Dollar spot"** : la maladie du "Dollar spot" causée par *Sclerotinia homoeocarpa* F. T. Bennett est une maladie destructive, très répandue sur gazon (Couch, 1995 in Rodrigue et Pfender, 1997). La lutte chimique contre cette maladie coûte très chère et la lutte biologique utilisant les souches d'*Enterobacter cloacae* (Huygood et Mazur, 1990) et plusieurs autres bactéries et champignons antagonistes fait l'objet d'investigation (Goodman et Burpee, 1991).

En effet, les souches de *Pseudomonas fluorescens* et de *P. lindhergii* empêchent l'infection par *S. homoeocarpa*. Dans l'étude menée par Rodrigue et Pfender (1997), la souche Pf.5 de *Pseudomonas fluorescens*, qui produit plusieurs métabolites antifongiques en plus des anti-

## Corynebacterium

Rares ou inexistantes sont les recherches qui évoquent le genre *Corynebacterium* tellurique en matière de relation avec les agents pathogènes Opgernorth et Endo (1983) ont isolé, à partir d'un sol cultivé par du céleri, une souche de *F. oxysporum* f.sp. *apii* à laquelle était associée plusieurs colonies de *Corynebacterium* spp. Ils ont montré que la croissance mycélienne en présence du *Corynebacterium* est significativement réduite à pH5. En outre, l'activité de *F. oxysporum* f.sp. *apii* dans le système racinaire du céleri diminue significativement lorsque les racines sont préalablement traitées avec une suspension de *Corynebacterium* spp. D'autres travaux ont montré aussi que l'augmentation de l'activité bactérienne s'accompagne d'une diminution de celle de *Fusarium oxysporum* f.sp. *apii* et ont conclu que les populations bactériennes du sol peuvent contribuer à la résistance des sols aux fusarioses (Scher et Baker, 1980).

## Conclusion

Cette revue bibliographique s'est proposée d'élucider les relations qui s'établissent entre les rhizobactéries et les agents pathogènes.

Les rhizobactéries étudiées dans ce domaine, appartiennent au groupe de *Pseudomonas fluorescens*, en particuliers, aux espèces *Pseudomonas fluorescens* et *P. putida*, *Bacillus*, *Agrobacterium*, *Enterobacter*, *Erwinia* et *Corynebacterium* avec leurs différentes espèces.

Les modes d'action de ces espèces s'apparentent surtout à la compétition nutritive, l'antibiose et l'induction de la résistance systémique.

Dans le cas de la compétition pour la nutrition, les *Pseudomonas fluorescens*, qui sont les plus étudiées, synthétisent des pigments fluorescents, sidérophores, qui chélatent le Fer ferrique et le rendent ainsi, indisponibles aux agents pathogènes telluriques. Ce type de compétition est observé entre autres avec les *Fusarium* spp. et les *Erwinia*.

La compétition par antibiose, est rencontrée au niveau des couples *Pythium*, *Rhizoctonia* spp. - *Pseudomonas fluorescens*, *Agrobacterium tumefaciens* - *A. radiobacter*, *Gaeumannomyces graminis* var *tritici*, - *P. fluorescens* spp. et *Bacillus* spp. - *G. graminis*, *Rhizoctonia* et *Pythium*. Elle s'effectue grâce à des substances exogènes sécrétées par les rhizobactéries antagonistes telles que la pyolutéorine, la pyrrolnitrine, la tropoline par les *Pseudomonas fluorescens*, et l'agrocine par *A. tumefaciens*.

Pour l'induction de la résistance systémique, le meilleur exemple cité dans cet article concerne la lutte contre la fusariose du concombre et du radis.

En perspective, l'utilisation de ces antagonistes en matière de lutte biologique nécessite la sélection d'une collection de rhizobactéries mutuellement compatibles, qui peuvent entrer en compétition avec les agents pathogènes sous des conditions d'environnement diverses. Il faut aussi s'intéresser à la maîtrise des facteurs d'environnement qui favorisent leur activité et leur survie, et développer des méthodes de réintroduction des antagonistes dans le sol, et dans le système racinaire, en vue de prolonger leur période de survie et d'efficacité.



## Remerciement

Nous tenons à remercier Dr. Lemanceau P. de l'INRA de Dijon, France qui a fait une première lecture critique très enrichissante de cet article.

## Références bibliographiques

- Achbani EH., Jouan B., Lenormand M. (1993a): Etude de la microflore de la rhizosphère de la pomme de terre sur différents substrats. *Al Awamia* 80, 135-159.
- Achbani EH., Jouan B., Lenormand M. (1993b). Etude de l'antagonisme de certaines souches bactériennes de la rhizosphère de la pomme de terre vis-à-vis d'*Erwinia carotovora* subsp. *atroseptica*. *Al Awamia*, 80, 39-59.
- Adde EA., Pfender WF. (1989) :The effect of primary inoculum level of *Pyrenophora tritici-repentis* on tan spot epidemic development in wheat. *Phytopathology* 79, 873-877.
- Alabouvette C. (1986) :*Fusarium* wilt suppressive soils from the châtaurenard region. *agronomie* 6, 213-284.
- Alabouvette C., Rouxel F., Louvet J. (1980): Recherche sur la résistance des sols aux maladies. VI mise en évidence de la spécificité de la résistance d'un sol vis-à-vis des *Fusarioses* vasculaires. *Phytopathology* 12, 11-19.
- Alabouvette C., Lemanceau P., Steinbing (1993): Recent advances in the biological control of *Fusarium* wilts. *Pesticide Science* 37, 365-373.
- Axelrod PE., Radley R. (1991) : Biological control of *Fusarium* on Douglas-Fir seedlings. "In Plant Growth-Promoting Rhizobacteria- Progress and prospects, ed Keel C. et al., 85-87. N.p. International organization for biological and integrated control of Noxious animals and plants, West palaearectic region section.
- Bagnasco P., De Lafuente L., Gualtieri G., Noya F., et Arias A. (1998) : Fluorescent *Pseudomonas* spp. as biological agents against forage legume root pathogenic fungi. *Soil biol. Biochem* 30, 1313-1322.
- Biles CL., Martyn RD. (1989) : Local and systemic resistance induced in watermelons by form specials of *Fusarium oxysporum*.. *Phytopathology* 79, 856-860.
- Burkhead KD., Slininger PJ., Schisler DA, (1998) : Biological control bacterium *Enterobacter cloacae* S11 : T : 07 (NRRLB-21050): produces the antifungal compound phenylacetic acid in sabouraid maltose broth culture. *Soil biol. Biochem* 30, 665-667.
- Burr TJ., Reid CL., Tagliati E., Btazzi C., Sule S. (1997): Biological control of grape Crown Gall by strain F2/5 is not associated with Agrocin production or competition for attachment sites on grape cells. *Phytopathology* 87, 706-711.
- Buysens S., Heungens K., Poppe J., Hofte M. (1996) : Involvement of pyochelin and pyoverdine in suppression of *Pythium*- induced damping-off of tomato by *Pseudomonas aeruginosa* 7NSK2. *Appl. Environ. Microbiol* 62, 865-871.
- Chiarini L., Bevivino A., Tabacchioni S., Dalmastrì C. (1998) : Inoculation of *Burkholderia cepacia*, *Pseudomonas fluorescens* and *Enterobacter* sp. on *Sorghum bicolor* : Root colonization and plant growth promotion of dual strain inocula *Soil biol. Biochem* 30, 81-87.

- Lemanceau P, Bakker PAHM, De Koget WJ, Alabouvette C, Schippers B (1993): Antagonistic effect of nonpathogenic *Fusarium oxysporum* Fo47 and *Pseudomonas* 358 upon pathogenic *Fusarium oxysporum* f.sp *dianthi*. *Appl. Environ. Microbiol* 59 : 74-82.
- Leong J (1986) : Siderophores: Their biochemistry and possible role in the biocontrol of plant pathogens. *Phytopathology* 24 : 187-209.
- Lim HS, Kim YS, Kim SD (1991) : *Pseudomonas stutzeri* YPL-1 genetic transformation and antifungal mechanism against *Fusarium solani*, an agent of plant root rot. *Appl. Environ. Microbiol* 57, 510-516.
- Lindow SE, Mc Gourty G, Elkins R (1996) : Interactions of antibiotics with *Pseudomonas fluorescens* strain A506 in the control of fire blight and injury to Pear. *Phytopathology* 86, 841-848.
- Loper JE (1988) : Role of fluorescent siderophore production in biological control of *Pythium ultimum* by a *Pseudomonas fluorescens* strain. *Phytopathology* 78, 166-172.
- Loper J E, Bayer J S (1991) : Siderophores in microbial interaction on plant surfaces. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 4 : 5-13.
- Louvet J, Rouxel F, Alabouvette C (1976): Recherche sur la résistance des sols aux maladies. I. Mise en évidence de la nature microbiologique de la résistance d'un sol au développement de la fusariose vasculaire du melon. *Phytopathology* 8, 425-436.
- Mahaffee WF, Backman PA (1993) : Effects of seed factors on spermosphere and rhizosphere colonization of cotton by *Bacillus subtilis* GB03.0. *Phytopathology* 83, 1120-1125.
- Maplestone PA, Campbell R (1989): Colonization of roots of Wheat seedling by bacilli proposed as biocontrol agents against take-all. *Soil Biol. Biochem* 21, 543-550.
- Maurhofer M, Hase C, Meuwly P, Metraux J P, Défago G (1994) : Induction of systemic resistance of tobacco necrosis virus by the root-colonizing *Pseudomonas fluorescens* strain CHAO: Influence of the *gac A* gene and of pyoverdine production. *Phytopathology* 84, 139-146.
- Mc Keen CD, Reilly CC, Pacey PI (1986) : Production and partial characterization of antifungal substances antagonistic to *Monilinia fructicola* from *Bacillus subtilis*. *Phytopathology* 76, 136-139.
- Mc Loughlin TS, Quinn JP, Betterman A, Bookland (1992) : *Pseudomonas cepacia* suppression of sunflower wilt fungus and role of antifungal compounds in controlling the disease. *Appl. Environ. Microbiol* 58, 1760-1763.
- Meyr JM, Abdallah MA (1978) : The fluorescent pigment of *Pseudomonas fluorescens* biosynthesis purification and physicochemical properties. *J. Microbiol* 107, 319-328.
- Mew TW, Rosales AM (1986): Bacterisation of rice plants for control of sheath blight caused by *Rhizoctonia solani*. *Phytopathology* 76, 1260-1264.
- Milton N, Schroth et Hancock JG (1982) : Disease : suppressive soil and root colonizing bacteria. *Science* 216, 1376.
- Montestinos E, Bonaterra A, Ophin Y, Beer SV (1996): Antagonism of selected bacterial strains to *Stemphylium vesicarium* and biological control of Brown Spot of Pear under controlled environment conditions. *Phytopathology* 86, 856-863.
- Nelson EB (1988): Biological control of *Pythium* seed rot and premergence damping-off of cotton with *Enterobacter cloacae* and *Erwinia herbicola* applied as seed treatments. *Plant Dis* 72, 140-142
- Noble Lee M (1997) : Overview of the research project. [www.quince.demon.co.uk/lee/phd.html](http://www.quince.demon.co.uk/lee/phd.html). Opgenorth DC, Endo RM (1983): Evidence that antagonistic bacteria suppress *Fusarium* wilt of celery in neutral and alkaline soils. *Phytopathology* 73, 703-708

- Parke JL, Rand RE, Joy AE, King EB (1991) : Biological control of Pythium damping-off and Aphanomyces root rot of peas by application of *Pseudomonas cepacia* or *P. fluorescens* to seed. *Plant Dis* 75, 987-992
- Paulitz TC, Park CS, Baker R (1987): Biological control of Fusarium wilt of cucumber with non pathogenic isolates of *Fusarium oxysporum*. *Can. J. Microbiol* 33, 349-353
- Pfender WF, Zhang W, Nus A (1993): Biological control to reduce inoculum of the tan spot pathogen *Pyrenophora tritici-repentis* in surface-borne residues of wheat fields. *Phytopathology* 83, 371-375
- Ponchey J (1982) : Réalités et perspectives de la lutte biologique contre les maladies des plantes. *agronomie* 2, 4, 305-314
- Raaijmakers J M, Weller D M, Thomashow L S (1997) : Frequency of antibiase producing *Pseudomonas* spp in natural environments. *Appl. Environ. Microbiol*, 63 : 881-887
- Raaijmakers J M, Weller D M (1998) : Natural plant protection by 2,4- diacetylphloroglucinol-producing *Pseudomonas* spp in take-all decline soils, *Molecular Plant-Microbe Interactions* 11 : 144-152
- Rhodes DJ, Logan C (1986) : Effects of fluorescent *Pseudomonas* on the potato blackleg syndrome. *Applied Biology* 108, 511-518
- Rodriguez F, Pfender WF (1997) : Antibiosis and antagonism of *Sclerotinia homoeocarpa* and *Drechslera poae* by *Pseudomonas fluorescens* Pf-5 *in vitro* and *in Planta*. *Phytopathology* 87, 614-621.
- Rankin L, Panlitz TC (1994) : Evaluation of rhizosphere bacteria for biological control of Pythium root rot of greenhouse cucumbers in hydroponics culture. *Plant Dis* 78, 447-451.
- Ryder Maarten H, Yan Z, Terrace TE, Rovira A.D, Tang W, Correll RL (1998) : Use of strains of *Bacillus* isolated in China to suppress take-all and Rhizoctonia root rot, and promote seedling growth of glasshouse-grown wheat in Australian soils. *Soil bio. Biochem* 31, 19-29.
- Scher FM, Baker R (1980): Mechanism of biological control in a Fusarium suppressive soil. *Phytopathology* 70, 412-417
- Scher FM, Baker R (1982) : Effect of *Pseudomonas putida* and a synthetic iron chelator on induction of soil suppressiveness to Fusarium wilt pathogens. *Phytopathology* 72, 1567-1573.
- Shah S, Jiping L, Moffatt BA, Glick BR (1998): Isolation and characterization of ACC desaminase genes from two different plant growth-promoting rhizobacteria. *Can. J. Microbiol* 44, 833-843.
- Sharga BM (1997): *Bacillus* isolates as potential biocontrol agents against chocolate spot on faba beans. *Can J. Microbiol* 43, 915-924
- Shipton PJ (1975) : Take-all decline during cereal monoculture. Pages: 137-144 *in* Biology and control of soil born plant pathogens. G.W.Bruehl, ed. Am. Phytopathol. Soc, st Paul. M.N. 216 pp
- Sholberg PL, Marchi A, Bechard J (1995): Biocontrol of post harvest diseases of apple using *Bacillus* spp. isolated from stored apples. *Can. J. Microbiol* 41, 247-252
- Sholberg PL, Haag PD (1996) : Incidence of postharvest pathogens of stored apples in British Columbia. *Plant pathol* 18, 81-85
- Smilanick JL, Gouin Beche CC, Margosan DA, Bull CT, Mackey BE (1996): Virulence on citrus of *Pseudomonas syringae* strains that control postharvest green mold of citrus fruit. *Plan Dis* 80, 1123-1128
- Smiley RW (1979) : Wheat rhizosphere *Pseudomonas* as antagonists of *Gaeumannomyces graminis* in soil. *Biol.Biochem* 11, 371-376.
- Snech B, Ichiclevich- Auster M, Plant Z (1989) : Mecanisme of seedling protection induced by a hypovirulent isolat of *Rhizoctonia solani*. *Can. J. B* 67, 2135-2141.

- Stockwell VO, Kavalek MD, Moore LW, Loper JE (1996) : Transfer of PAgK84 from the biocontrol agent *Agrobacterium radiobacter* K84 to *A. tumefaciens* under field conditions. *Phytopathology* 86, 31-37.
- Tamietti G., Alabouvette C (1986) : Resistance des sols aux maladies : XIII. Rôle des *Fusarium oxysporum* non pathogènes dans les mécanismes de résistance d'un sol de Noirmoutier aux Fusarioses vasculaires. *agronomie* 6, 541-548
- Taraz K, Tappe R, Schroder H (1991) : Ferribactins the biogenetic precursors of pyoverdins. 527-533
- Thomashow LS, Weller DM, Bonsall RF, Pierson LS (1990): Production of the antibiotic phenazine-1-carboxylic acid by fluorescent *Pseudomonas* species in the rhizosphere of wheat. *Appl. Environ. Microbio* 56, 908-912.
- Thompson DC, Clarke BB, Kobaya Shi DY (1996) : Evaluation of bacterial antagonists for reduction of Summer patch symptoms in Kentucky Bluegrass. *Plant Dis* 80, 856-862.
- Thompson DC, Kobayashi DY, Clarke BB (1998) : Suppression of Summer patch by rhizosphere competent bacteria and their establishment on Kentucky Bluegrass. *Soil biol. Biochem* 30, 257-263
- Tourvieille D (1985) : Contamination du capitule de tournesol par les ascospores de *Sclerotinia sclerotiorum*. *agronomie* 5, 564
- Van DK, Nelson EB (1998): Inactivation of seed exudate stimulants of *Pythium ulimum* sporangium germination by biocontrol strains of *Enterobacter cloacae* and other seed-associated bacteria. *Soil biol. Biochem*, 30, 183-192
- Van Loon LC, Bakker PAHM, Pieterse CMJ (1998) : Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria. *Ann. Rev. Phytopathol* 36 : 453-483
- Weï G, Kloepper W, Tuzan S (1996): Induced systemic resistance to cucumber diseases and increased plant growth by Plant Growth Promoting Rhizobacteria under field conditions. *Phytopathology* 86, 221-223
- Weller DM (1988): Biological control of soilborne plant pathogens in the rhizosphere with bacteria. *Phytopathology* 26, 379-407
- Weller DM, Cook RJ (1983): Suppression of Take-all of wheat by seed treatments with fluorescent *Pseudomonas*. *Phytopathology* 73, 463-469
- Weller DM, Cook RJ (1981) : *Pseudomonas* from take-all conductive and suppressive soils. *Phytopathology* 71, 264 (abst)
- Yuen GY, Schorth MN, Mecain AH (1985) : Production of *Fusarium* wilt of carnation with suppressive soils and antagonistic bacteria. *Plant Dis* 69, 1071-1075
- Zizzerini A, Tosi L, Rossi J (1987) : Antagonistic effects of *Bacillus* spp. on *Sclerotinia sclerotiorum* sclerotia. *Phytopathology* 26, 785-789