



Effets des rhizobactéries PGPR sur le rendement et les teneurs en macroéléments du maïs sur sol ferrallitique non dégradé au Sud-Bénin

Adolphe ADJANOHOUN¹, Pacôme Agossou NOUMAVO², Rachidatou SIKIROU³,
Marcellin ALLAGBE¹, Henriette GOTOCHAN-HODONOU⁴, Koya Kovise DOSSA¹,
Boniface YEHOUENOU², Romain GLELE KAKAÏ⁵ et Lamine BABA-MOUSSA^{2*}

¹Centre de Recherches Agricoles Sud/Institut National des Recherches Agricoles du Bénin.
BP 03 Attogon, Bénin.

²Laboratoire de Biologie et de Typage Moléculaire en Microbiologie/Département de Biochimie et de Biologie
Cellulaire/Faculté des Sciences et Techniques/Université d'Abomey-Calavi. 05 BP 1604 Cotonou, Bénin.

³Laboratoire de Défense des Cultures/Centre de Recherches Agricoles d'Agonkanmey/Institut National des
Recherches Agricoles du Bénin. 01 BP 128 Porto-Novo, Bénin.

⁴Institut National des Recherches Agricoles du Bénin. BP 884 Cotonou, Bénin.

⁵Faculté des Sciences Agronomiques/Université d'Abomey-Calavi. 01 BP 526 Abomey-Calavi, Bénin.

*Auteur correspondant, Email : laminesaid@yahoo.fr ; Tél : +229 97123468

RESUME

L'objectif de l'étude est d'évaluer les effets de 15 rhizobactéries promotrices de croissance végétative (PGPR en Anglais) sur le rendement et l'état nutritionnel des plants de maïs sur sol ferrallitique non dégradé du Sud-Bénin. Les semences de maïs ont été inoculées avec des concentrations microbiennes d'environ 10⁸ UFC/ml. Les teneurs en azote, en phosphore et en potassium d'échantillons de plants de maïs ont été déterminées. Les valeurs de rendement du maïs ont été soumises à une analyse de la variance à deux facteurs. Les rhizobactéries *Pseudomonas fluorescens* ont induit le rendement de maïs le plus élevé, dépassant de 41,46% le rendement de maïs obtenu avec l'inoculation de *P. putida* et de 118,05% le rendement de maïs obtenu au niveau des plants non inoculés. Les rendements de maïs induits par *P. putida* et *Azospirillum lipoferum* sont supérieurs respectivement de 54,17% et de 26,39% au rendement obtenu au niveau des plants non inoculés. Les résultats obtenus augurent de la possibilité d'utiliser les rhizobactéries PGPR comme des engrais biologiques pour une production durable de maïs. Au Sud du Bénin, où la pression démographique est forte et la baisse de la fertilité des sols croissante, l'utilisation de méthodes biologiques pour accroître les récoltes est une solution incontournable.

© 2012 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Rhizobactéries, Rendement, Maïs, Sol ferrallitique, Bénin.

INTRODUCTION

Le maïs (*Zea mays* L.) occupe une place importante dans les systèmes de production agricole dans toutes les zones agroécologiques

du Bénin. Il est la principale céréale intervenant dans l'alimentation des populations. Bien qu'étant une culture vivrière, le maïs est devenu également une

© 2012 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v6i1.24>

culture de rente. Au Sud du Bénin, sa production est confrontée à de nombreuses contraintes parmi lesquelles la baisse de la fertilité des sols occupe une place prépondérante. En effet, les études pédologiques ont montré que les sols ferrallitiques du Sud-Bénin se sont formés sur des sédiments argilo-sableux et sablo-argileux, très profonds et bien drainés avec souvent une bonne fertilité originelle qui se perd très vite (Igué, 1992). Dans ces types de sols, la minéralisation de la matière organique est très accélérée sous l'effet conjugué du climat et des cultures (Diels et al., 2003). Par conséquent, la production du maïs de manière à assurer l'autosuffisance alimentaire et des revenus substantiels aux producteurs, reste encore tributaire de l'utilisation intensive des engrais chimiques. Cette approche n'est pas sans conséquences négatives.

Alalaoui (2007) affirme que l'utilisation intensive des engrais minéraux peut engendrer des problèmes comme l'écoulement de ces engrais vers les rivières, les lacs et les cours d'eaux où ils constituent une source de pollution. Hernandez et al. (1995) affirment que l'inoculation des semences de maïs par les rhizobactéries *Pseudomonas cepacia*, *P. fluorescens* et *Streptomyces aurantiacus*, en combinaison avec une dose de 120 kg/ha d'azote, permet d'obtenir un accroissement de plus de 25% des rendements par rapport à ceux obtenus avec la même dose d'azote mais sans inoculation par les microorganismes. Aussi, la combinaison des rhizobactéries suscitées avec une dose de 120 kg/ha d'azote permet d'accroître de plus de 60% les rendements de maïs en comparaison avec ceux obtenus sur des parcelles sans application d'azote ni inoculation de bactéries. Nezarat et Gholami (2009) ont confirmé les résultats positifs sur le rendement des cultures inoculées par les rhizobactéries promotrices de croissance végétale ou « plant growth promoting rhizobacteria » (PGPR), en anglais.

Islam et al. (2009) expliquent ces résultats par le fait que les rhizobactéries sécrètent des substances qui provoquent une amélioration de la nutrition des plantes colonisées de par l'absorption de l'ion nitrate par la plante, la solubilisation du phosphate et la chélation du fer. L'utilisation des PGPR dans la production du maïs est un atout majeur pour accroître la production de cette spéculature. C'est dans ce cadre que Adjanohoun et al. (2011) ont identifié 15 PGPR dont *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas putida*, *Streptomyces hygroscopicus*, *Streptomyces rimosus*, *Streptomyces fasciculatus*, *Bacillus coagulans*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus polymixa*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus lentus*, *Bacillus circulans*, *Bacillus firmus* et *Azospirillum lipoferum* dans les rhizosphères de plants de maïs au niveau des différents agrosystèmes du Sud-Bénin.

La présente étude évalue les effets de ces rhizobactéries promotrices de croissance végétative sur le rendement du maïs et les teneurs des plants de maïs en azote, en phosphore et en potassium sur sol ferrallitique non dégradé au Sud-Bénin afin de promouvoir leur utilisation future comme des bio-fertilisants.

MATERIEL ET METHODES

Zone d'étude

L'étude a été conduite sur la station expérimentale du Centre de Recherches Agricoles du Sud-Bénin située à une altitude de 105°, longitude 2° 19' Est, latitude 6° 12' Nord. Le climat de la zone est du type subéquatorial maritime à deux saisons de pluies et à deux saisons sèches. La pluviométrie moyenne, de 1.200 mm, est étalée sur 7 mois (mai à novembre) avec des précipitations maximales en juin et octobre et des minimales en août. La température moyenne est de l'ordre de 27 °C (Ayena,

2000). Le sol est ferrallitique, profond et sans concrétion (Aïhou, 2003). Le pH-eau du sol est de 6,2. Le taux de matière organique du sol est de 1,6%. La teneur en phosphore assimilable est de 18,5 ppm. Les bases échangeables tels que le potassium, le calcium et le magnésium présentent des valeurs respectives de 0,2 méq/100 g de sol, 4,7 méq/100 g de sol et 1,7 méq/100 g de sol (Adjanooun et al., 2011).

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental était un bloc aléatoire complet à 16 traitements et à 4 répétitions. Les différents traitements ont couvert chacun une parcelle élémentaire de 4 m x 3,2 m soit 12,8 m². Chaque parcelle élémentaire comportait 4 lignes de 4 m de long. La parcelle utile de 6,4 m², où les données de rendement ont été collectées, comprenait les 2 lignes centrales. Les traitements étaient les suivants: parcelles semées sans rhizobactéries (T0); parcelles semées aux semences inoculées avec les rhizobactéries ci-après : *Pseudomonas putidas* (T1), *P. aeruginosa* (T2), *P. fluorescens* (T3), *Streptomyces hygroscopicus* (T4), *S. rimosus* (T5), *S. fasciculatus* (T6), *Azospirillum lipoferum* (T7), *Bacillus coagulans* (T8), *B. thuringiensis* (T9), *B. pumilus* (T10), *B. polymixa* (T11), *B. licheniformis* (T12), *B. lentus* (T13), *B. circulans* (T14) et *B. firmus* (T15). Ces rhizobactéries sont identifiées et caractérisées par Adjanooun et al. (2011) et conservées au Laboratoire de Biologie et de Typage Moléculaire en Microbiologie de l'Université d'Abomey-calavi du Bénin. La variété de maïs utilisée est la composite EVDT 97 STR C1 de 85 à 90 jours de cycle (Badu et Yallou, 2009). Le semis a été fait à un écartement de 0,80 m x 0,40 m soit une densité de 31.250 plants/ha (Hernandez et al., 1995).

Préparation des inocula

Quinze inocula ont été préparés à base des 15 souches de rhizobactéries. Les inocula

ont été obtenus par culture des rhizobactéries en milieux nutritifs liquides sous agitation pendant 24 heures et à 30 °C pour les *Pseudomonas* et *Streptomyces* et à 37 °C pour les *Bacillus* et *Azospirillum*. Les concentrations microbiennes d'environ 10⁸ UFC/millilitre ont été utilisées pour inoculer les semences de maïs.

Inoculation-semis

Après la trouaison d'environ 5 cm de profondeur, deux grains de maïs y ont été déposés. Les semences ont été immédiatement inoculées par arrosage avec 15 ml de la suspension bactérienne en fonction de chaque traitement. La parcelle élémentaire a comporté 4 lignes de 4 m de long.

Détermination des teneurs en azote, phosphore et potassium

Par parcelle élémentaire, deux plants de maïs munis de racines, de tiges, de feuilles et des épis portant des grains ont été prélevés à la récolte, soit 87 jours après semis (JAS). Ces plants ont été coupés en petits morceaux et mélangés dans un seau. De ce mélange, 500 g ont été prélevés dans un sac de polyéthylène et étiqueté. Au total, 64 échantillons ont été prélevés et envoyés au laboratoire pour la détermination des teneurs en azote, phosphore et potassium. Après la minéralisation de la matière végétale et la distillation par la méthode de Kjeldahl (1883), la teneur en azote a été déterminée par la titration, celle du phosphore par la colorimétrie et celle du potassium par le spectrophotomètre d'absorption atomique (Thomas, 1982).

Détermination des valeurs de rendement du maïs

Seules les plantes situées sur les deux lignes centrales de chaque parcelle élémentaire ont été récoltées. La superficie élémentaire de calcul de rendement est de 6,4 m². Les épis de maïs récoltés ont été despathés, égrenés et pesés par parcelle élémentaire de calcul de rendement, à l'aide d'une balance de précision (Balance Mxx, Fisher scientific, Bioblock®). Les valeurs de

rendement ont été obtenues par la formule suivante :

$$R = \frac{P \times 10000}{6,4}$$

Où :

- R est le rendement du maïs, exprimé en kg/ha ;
- P est le poids du maïs par superficie élémentaire de calcul, exprimé en kg/ha.

Analyses statistiques des données

Les valeurs de rendement du maïs par traitement et par répétition ont été soumises à une analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs, d'un modèle mixte (répétitions et traitement) sans interaction afin d'évaluer les effets des rhizobactéries sur le rendement du maïs. Dans ce modèle d'analyse, les 16 traitements ont été considérés comme un facteur fixe alors que les répétitions ont constitué le facteur aléatoire. Les moyennes ajustées ou moyenne des moindres carrés (least square means) de chaque paramètre ont été extraites de l'analyse pour chacun des 16 traitements. Ces valeurs ont été ensuite soumises à une classification numérique (algorithme de Ward) afin de regrouper les 16 traitements en groupes homogènes de rendement. La classification numérique a été préférée au test traditionnel de Newman et Keuls du fait du nombre élevé des niveaux du facteur «traitement» (Dagnelie, 1998).

RESULTATS

Effet des différentes rhizobactéries sur le rendement du maïs

L'analyse de la variance des rendements moyens de maïs, obtenus par parcelle élémentaire de calcul (Tableau 1), a montré qu'une différence très hautement significative ($p < 0,0001$) existait entre les rendements moyens des plants inoculés et non inoculés par les différentes rhizobactéries. Lorsque

l'analyse de la classification numérique des rendements moyens de maïs a été réalisée, le dendrogramme obtenu montrait que les rendements issus des plants non inoculés (témoins) et des plants inoculés avec les 15 espèces de rhizobactéries se sont divisés en deux groupes (Figure 1). Le groupe G1 a rassemblé les plants inoculés avec la rhizobactérie *P. fluorescens*. Le groupe G2 a rassemblé les plants inoculés avec les autres rhizobactéries que sont *P. putida*, *P. aeruginosa*, *B. coagulans*, *B. thuringiensis*, *B. pumilus*, *B. polymixa*, *B. licheniformis*, *B. lentus*, *B. circulans*, *B. firmus*, *S. hygroscopicus*, *S. fasciculatus*, *S. rimosus* et *A. lipoferum* ainsi que les plants non inoculés.

Le rendement moyen des plants du groupe G1, extrapolé en kilogramme par hectare, a été de 3.925,87 kg/ha, tandis que ceux des plants du groupe G2 de l'ordre de 1875 à 2890,63 kg/ha ont été significativement inférieurs à cette valeur ($p < 0,0001$).

Le groupe G2 s'est subdivisé en quatre sous-groupes que sont G2₁, G2₂, G2₃, et G2₄. Le sous-groupe G2₁ a réuni les plants inoculés avec *P. putida*, ayant un rendement moyen, extrapolé en kilogramme par hectare, de 2.775,15 kg/ha. Au niveau du sous-groupe G2₂, les plants inoculés avec *A. lipoferum* ont présenté un rendement moyen, extrapolé en kilogramme par hectare, de 2.255,63 kg/ha. Les plants inoculés avec *S. hygroscopicus*, *S. fasciculatus*, *S. rimosus*, *B. thuringiensis* et *B. circulans* ont composé le sous-groupe G2₃ avec un rendement moyen, extrapolé en kilogramme par hectare, de 2.025,25 kg/ha. Le sous-groupe G2₄ a rassemblé les plants inoculés avec *B. coagulans*, *B. pumilus*, *B. polymixa*, *B. licheniformis*, *B. lentus*, *B. firmus*, *P. aeruginosa* et le témoin ayant un rendement moyen, extrapolé en kilogramme par hectare, de 1.871,88 kg/ha.

Effet des différentes rhizobactéries sur les teneurs en azote, en phosphore et en potassium des plants de maïs

Avec un niveau de similarité entre les individus d'un même groupe de 99,4%, le dendrogramme de la classification numérique des teneurs en azote et en potassium des plants sous les différents traitements (Figure 2) a montré que les 15 rhizobactéries en étude se sont classées en 2 groupes. Le groupe G1, dont les teneurs en azote et en potassium des plants ont été significativement les plus élevées, est constitué des plants inoculés avec les rhizobactéries *P. fluorescens*, *P. putida* et *A. lipoferum*. Tous les plants inoculés avec les autres rhizobactéries et le témoin ont été classés dans le groupe G2.

Le groupe G1 est subdivisé en deux sous-groupes. Le sous-groupe G1₁ est constitué de plants inoculés avec *P. fluorescens*, tandis que le sous-groupe G1₂ est constitué de plants inoculés avec *P. putida* et *A. lipoferum*. La teneur en azote des plants

sous les effets de *P. fluorescens* a été supérieure de 28,84% à la teneur en azote des plants sous les effets de *P. putida* qui a été, à son tour, supérieure de 11,58% à la teneur en azote des plants sous les effets de *A. lipoferum*. La teneur du potassium dans les plants sous les effets de *P. fluorescens* a été supérieure de 25,45% à sa teneur dans les plants sous les effets de *P. putida* qui a été, à son tour, supérieure de 111,53% à sa teneur dans les plants sous les effets de *A. lipoferum* (Tableau 2).

L'analyse de la variance des différentes teneurs en azote, en phosphore et en potassium obtenues des plants à semences inoculées aux différentes rhizobactéries, a montré une différence significative entre les rhizobactéries pour le phosphore ($p < 0,01$) et une différence hautement significative entre les rhizobactéries en ce qui concerne l'azote et le potassium ($p < 0,0001$).

Tableau 1 : Valeurs moyennes réelles des rendements de maïs obtenues par parcelle élémentaire de calcul.

Traitement	Rendements (kg)
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	2,51
<i>Pseudomonas putida</i>	1,85
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1,18
<i>Bacillus coagulans</i>	1,28
<i>Bacillus thuringiensis</i>	1,33
<i>Bacillus circulans</i>	1,37
<i>Bacillus polymixa</i>	1,27
<i>Bacillus licheniformis</i>	1,27
<i>Bacillus firmus</i>	1,27
<i>Bacillus lentus</i>	1,23
<i>Bacillus pumilus</i>	1,28
<i>Azospirillum lipoferum</i>	1,44
<i>Streptomyces hygroscopicus</i>	1,35
<i>Streptomyces rimosus</i>	1,32
<i>Streptomyces fasciculatus</i>	1,38
Sans bactérie	1,20

Tableau 2 : Valeurs moyennes des teneurs en azote, en phosphore et en potassium des plants de maïs sous les effets des différentes rhizobactéries.

Traitement	Teneur en % de matière sèche (MS) de		
	Azote	Phosphore	Potassium
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	3,35	0,22	0,69
<i>Pseudomonas putida</i>	2,60	0,21	0,55
<i>Azospirillum lipoferum</i>	2,33	0,21	0,26
<i>Bacillus coagulans</i>	1,17	0,19	0,21
<i>Bacillus thuringiensis</i>	1,21	0,18	0,22
<i>Bacillus circulans</i>	1,20	0,19	0,20
<i>Bacillus polymixa</i>	1,22	0,20	0,23
<i>Bacillus licheniformis</i>	1,20	0,20	0,21
<i>Bacillus firmus</i>	1,18	0,18	0,20
<i>Bacillus lentus</i>	1,21	0,19	0,24
<i>Bacillus pumilus</i>	1,19	0,18	0,23
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1,21	0,15	0,23
<i>Streptomyces hygroscopicus</i>	1,15	0,18	0,20
<i>Streptomyces rimosus</i>	1,21	0,18	0,21
<i>Streptomyces fasciculatus</i>	1,20	0,21	0,20
Sans bactérie	1,18	0,15	0,25

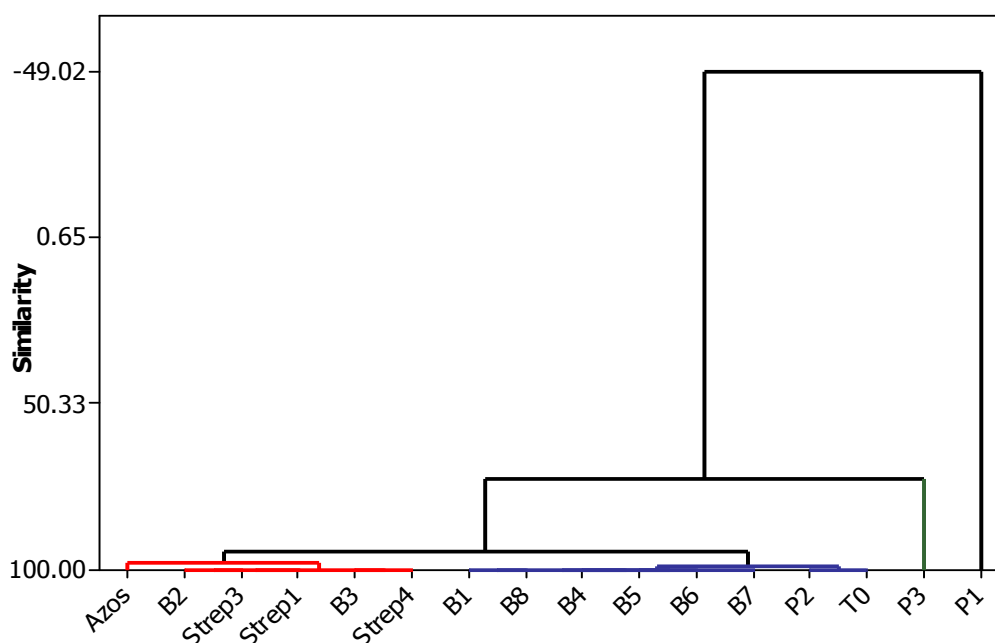


Figure 1: Dendrogramme montrant la relation entre les effets des 15 rhizobactéries sur le rendement des plants de maïs.

Légende :

- P1 = *Pseudomonas fluorescens* ; P2 = *P. aeruginosa* ; P3 = *P. putida*
- Strep1 = *Streptomyces hygroscopicus* ; Strep3 = *S. rimosus* ; Strep4 = *S. fasciculatus*
- B1 = *Bacillus coagulans* ; B2 = *B. thuringiensis* ; B3 = *B. circulans* ; B4 = *B. polymixa*
- B5 = *B. licheniformis* ; B6 = *B. firmus* ; B7 = *B. lentus* ; B8 = *B. pumilus*
- Azos = *Azospirillum lipoferum*
- T0= Témoins non inoculé.

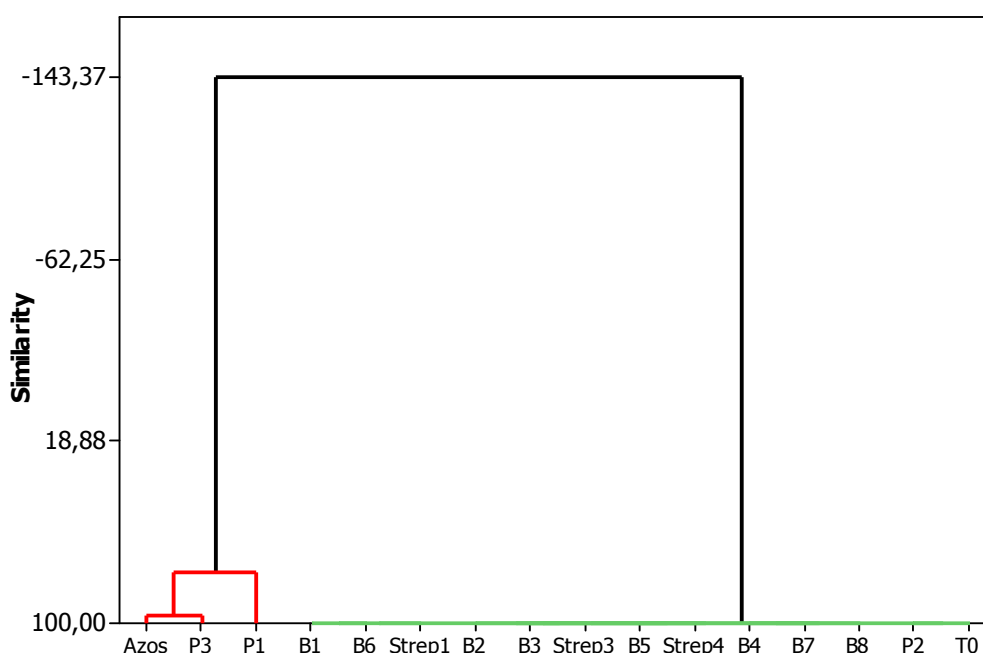


Figure 2: Dendrogramme montrant la relation entre les effets des 15 rhizobactéries sur les teneurs en azote, phosphore et potassium des plants de maïs.

Légende :

- P1 = *Pseudomonas fluorescens* ; P2 = *P. aeruginosa* ; P3 = *P. putida*
- Strep1 = *Streptomyces hygroscopicus* ; Strep3 = *S. rimosus* ; Strep4 = *S. fasciculatus*
- B1 = *Bacillus coagulans* ; B2 = *B. thuringiensis*; B3 = *B. circulans*; B4 = *B. polymixa*
- B5 = *B. licheniformis* ; B6 = *B. firmus* ; B7 = *B. lentus* ; B8 = *B. pumilus*
- Azos = *Azospirillum lipoferum*
- T0= Témoins non inoculé.

DISCUSSION

Dans les sols ferrallitiques non dégradés au Sud-Bénin, les rhizobactéries *P. fluorescens* induisent le rendement moyen de maïs le plus élevé, dépassant de 41,46% le rendement moyen de maïs obtenu avec l'inoculation de *P. putida* qui vient en deuxième position. Le rendement moyen de maïs induit par *A. lipoferum*, classé troisième dans l'ordre de grandeur, est inférieur de 74,04% et de 23,03% respectivement aux rendements moyens obtenus avec l'inoculation de *P. fluorescens* et de *P. putida*. Les rendements moyens de maïs obtenus avec l'inoculation de *S. hygroscopicus*, *S. rimosus*, *S. fasciculatus*, *Bacillus thuringiensis*, *B. circulans*, d'une part et *P. aeruginosa*, *B. coagulans*, *B. pumilus*, *B. polymixa*, *B.*

licheniformis, *B. lentus*, *B. firmus*, d'autre part, sont respectivement inférieurs de 93,84% et de 109,72% au rendement moyen obtenu avec l'inoculation de *P. fluorescens*. Ces rendements moyens de maïs occupent respectivement le quatrième et le cinquième rang dans l'ordre de grandeur. Le rendement moyen obtenu sans inoculation de bactéries est similaire aux rendements moyens obtenus avec l'inoculation de *P. aeruginosa*, *B. coagulans*, *B. pumilus*, *B. polymixa*, *B. licheniformis*, *B. lentus*, *B. firmus*. Ce résultat démontre que les rhizobactéries *P. aeruginosa*, *B. coagulans*, *B. pumilus*, *B. polymixa*, *B. licheniformis*, *B. lentus* et *B. firmus* n'ont pas eu d'effet promoteur de croissance sur le maïs. Les effets significatifs induits par les rhizobactéries *Pseudomonas*

fluorescens et *P. putida* sur le rendement des plants de maïs corroborent les effets significatifs induits par ces mêmes rhizobactéries sur la croissance des plants de maïs signalés par Adjanohoun et al. (2011). En effet, ces auteurs ont rapporté qu'à 87 jours après le semis, les valeurs moyennes de la biomasse aérienne fraîche des plants de maïs inoculés avec *P. fluorescens* et *P. aeruginosa* ont significativement dépassé, respectivement de 59,57% et 23,40%, la valeur moyenne de biomasse aérienne fraîche obtenue au niveau des plants de maïs non inoculés sur sol ferrallitique non dégradé au Sud-Bénin. Les résultats obtenus corroborent ceux publiés par Kang et al. (2010) et relatifs aux effets de *P. fluorescens*, *A. lipoferum* et *Bacillus* spp. sur le rendement du maïs et du blé. Biari et al. (2008) ont signalé une augmentation hautement significative du poids sec des graines de maïs issues lorsque les semences de maïs sont inoculées par *A. lipoferum*, *A. brasilense* et *A. chroococcum*. Nezarat et Gholami (2009), dans l'étude de l'effet des rhizobactéries PGPR sur le développement du maïs, ont montré que les souches *P. putida*, *P. fluorescens*, *A. lipoferum* et *A. brasilense* ont significativement amélioré la production de maïs. Shaharouna et al. (2006) ont mentionné, de façon particulière, l'efficacité de *Pseudomonas* spp. avec un accroissement significatif de la croissance des plants de maïs et du rendement du maïs lorsque les plantes de maïs reçoivent des quantités adéquates d'azote. Hernandez et al. (1995) affirment que les espèces *P. cepacia*, *P. fluorescens* et *S. aurantiacus* sont les plus efficaces sur les sols ferrallitiques rouges de Cuba.

Les plants de maïs, inoculés avec les rhizobactéries *P. fluorescens*, *P. putida* et *A. lipoferum*, ayant donné les rendements moyens de maïs les plus élevés sont ceux qui ont les teneurs en azote et en potassium les plus élevées ($p < 0,0001$). Biari et al. (2010) ont expliqué l'augmentation des rendements de maïs obtenus au niveau des plants inoculés avec les rhizobactéries par l'absorption plus accrue de l'azote, du phosphore, du

potassium, du fer, du zinc, du manganèse et du cuivre. Walker et al. (2011) ont expliqué les effets positifs des rhizobactéries sur la croissance et le développement des plants de maïs par des modifications qualitatives et quantitatives importantes des benzoxazinoïdes. Toutefois, selon Contesto et al. (2008), l'effet positif des rhizobactéries promotrices de la croissance végétale sur les plants est dû à la synthèse d'hormones végétales qui modifient le niveau des hormones endogènes et induisent la combinaison de plusieurs effets pléiotropes. Ahmad et al. (2006) et Estes et al. (2004) expliquent l'influence positive des rhizobactéries promotrices de la croissance végétale sur le développement des plants par une meilleure germination des semences puis un meilleur développement postérieur des racines ; ce qui induit l'augmentation de la capacité d'absorption des nutriments et de l'eau chez les plantes.

Les résultats obtenus permettent de souligner que des 15 PGPR en étude, *Pseudomonas fluorescens*, *P. putida* et *Azospirillum lipoferum* ont un effet très positif sur la teneur des plants de maïs en azote et en potassium, et par conséquent, sur les rendements du maïs. Par conséquent, dans les sols ferrallitiques non dégradés du Sud-Bénin, ces rhizobactéries peuvent être utilisées pour accroître la productivité du maïs. Cependant, les doses d'engrais chimiques que l'utilisation des rhizobactéries *P. fluorescens*, *P. putida* et *Azospirillum lipoferum* permet d'économiser restent à quantifier. De même, les formes sous lesquelles ces rhizobactéries seront rendues disponibles pour une production de maïs économiquement viable restent encore à déterminer.

Conclusion

L'inoculation des plants de maïs par les rhizobactéries *Pseudomonas fluorescens*, *P. putida* et *Azospirillum lipoferum* permet d'améliorer significativement le rendement du maïs et l'état nutritionnel des plants de maïs sur les sols ferrallitiques non dégradés du Sud

du Bénin. Ces résultats augurent de la possibilité d'utiliser ces rhizobactéries comme des fertilisants biologiques pour une production de maïs durable. Au Sud du Bénin, où la forte pression démographique et la baisse croissante de la fertilité des sols mettent constamment en péril les filières agricoles, l'agriculture alternative, respectueuse de l'environnement, favorisant l'usage de méthodes biologiques pour accroître les récoltes, est une solution incontournable. Toutefois, les expérimentations doivent être conduites en milieu réel sur des parcelles de grandeur nature de l'ordre de 2 à 4 ha afin de déterminer les valeurs des rendements obtenus à l'hectare sans extrapolation, de mieux apprécier l'effet des gradients de fertilité des sols ferrallitiques non dégradés du Sud du Bénin et de mieux cerner les contours de l'utilisation au champ chez des producteurs agricoles des rhizobactéries comme des engrais biologiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB) pour avoir financé ces travaux.

REFERENCES

- Adjanooun A, Baba-Moussa L, Glèlè Kakaï R, Allagbé M, Yèhouéou B, Gotoéchan-Hodonou H, Sikirou R, Sessou P, Sohounhloué D. 2011. Caractérisation des rhizobactéries potentiellement promotrices de la croissance végétative du maïs dans différents agrosystèmes du Sud-Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **5**(2): 433-444.
- Ahmad F, Ahmad I, Khan MS. 2006. Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiol. Res.*, **163**(2): 173-181.
- Aïhou K. 2003. Interaction between organic input by *Cajanus cajan* and inorganic fertilization to maize in the derived savanna of the Bénin Republic. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, p.114.
- Alalaoui AC. 2007. Fertilisation minérale des cultures : les éléments fertilisants majeurs (Azote, Potassium et Phosphore). Bulletin Mensuel d'Information et de Liaison, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, Maroc, n° 155, 1-4.
- Badu-Apraku B, Yallou CG. 2009. Registration of Striga-Resistant and Drought-Tolerant Tropical Early Maize Populations TZE-W Pop DT STR C4 and TZE-Y Pop DT STR C4. *J. Plant Regist.*, **3**(1): 86-90.
- Biari A, Gholami A, Rahmani HA. 2008. Growth promotion and enhanced nutrient uptake of maize (*Zea mays* L.) by application of plant growth promoting rhizobacteria in Arid region of Iran. *J. Boil. Sci.*, **8**: 1015-1020.
- Contesto C, Desbrosses G, Lefoulon C, Béna G, Borel F, Galland M, Gamet L, Varoquaux F, Touraine B. 2008. Effects of rhizobacterial ACC deaminase activity on *Arabidopsis* indicate that ethylene mediates local root responses to plant growth-promoting rhizobacteria. *Plant Sci.*, **175**: 178-189.
- Dagnelie P. 1998. *Statistique Théorique et Appliquée* (Tome 1 & 2). Presses agronomiques de Gembloux : Paris, France.
- Diels JK, Aïhou E, Iwuafé R, Merckx B, Vanlauwe. 2003. Evaluer les options pour le maintien du taux de carbone organique dans le sol en agriculture intensive en savane d'Afrique de l'Ouest à l'aide du modèle Rothamsted Carbone. In *Outils d'Aide à la Décision pour l'Agriculture en Afrique Subsaharienne*, Struif BTE, Wopereis MCS (Eds). 151-161.
- Estes BL, Enebak SA, Chappelka AH. 2004. Loblolly pine seedling growth after inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria and ozone exposure. *Can. J. Forest Res.*, **34**(7): 1410-1416.
- Hernandez AN, Hernandez A, Heydrich M. 1995. Selección de rhizobacterias asociadas al cultivo del maíz. *Cultivos tropicales*, **16**(3): 5-8.

- Igué M. 1992. Utilisation des données pédologiques pour une agriculture durable: cas des terres de barre au sud du Bénin. 12^e réunion du sous-comité Ouest et Centre Africain de Corrélation des sols, Rapport FAO sur les ressources en sols du monde N° 72, 109-127.
- Islam MR, Madhaiyan M, Deka-Boruah HP, Yim W, Lee G, Saravanan VS, Fu Q, Hu H, Sa T. 2009. Characterization of plant growth-promoting traits of three-living diazotrophic bacteria and their inoculation effects on growth and nitrogen uptake of crop plants. *J. Microbiol. Biotechnol.*, **19**(10): 1213-1222.
- Kang Y, Cheng J, Mei L, Yin S. 2010. Screening and identification of plant growth-promoting rhizobacteria. *Wei Sheng Wu XueBao.*, **50**(7): 853-861.
- Kjeldahl J. 1883. A new method for the determination of nitrogen in organic matter. *Z. Anal. Chem.*, **22**: 366-382.
- Nezarat S, Gholami A. 2009. Screening plant growth promoting rhizobacteria for improving seed germination, seedling growth and yield of maize. *Park. J. Biol. Sci.*, **12**(1): 26-32.
- Shaharoon AAZ, Muhammad AB, AzeemKalid A. 2006. Performance of *Pseudomonas spp.* containing ACC-deaminase for improving growth and yield of maize (*Zea mays* L.) in the presence of nitrogenous fertilizer. *Soil Biol. Biochem.*, **38**(9): 2971-2975.
- Thomas GW. 1982. Exchangeable cations. In: *Methods of Soil Analysis. Agronomy*, **9**: 154-157.
- Walker V, Bertrand C, Bellvert F, Moënne-Loccoz Y, Bally R, Comte G. 2011. Host plant secondary metabolite profiling shows a complex, strain-dependent response of maize to plant growth-promoting rhizobacteria of the genus *Azospirillum*. *New Phytol.*, **189**(2): 494-506.