

## Abondance et diversité des Rhizobactéries Promotrices de la croissance des Plantes (PGPR) au sein des associations culturales à base de bananiers au Nord-Kivu (RDC)

Toto MAKISO LWANGA<sup>1,2,3,4\*</sup>, Victor Joly DZOKOU<sup>4,6</sup>, Antoine AFFOKPON<sup>5</sup>  
et Joseph DJEUGAP FOVO<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut Supérieur de Développement Rural, ISDR-Beni, Section Développement Rural, BP 177 Beni, Nord-Kivu, RDC

<sup>2</sup> Université Officielle de Semuliki de Beni, U.O.S-Beni, Faculté des Sciences Agronomiques, BP 48 Beni, Nord-Kivu, RDC

<sup>3</sup> Université du Lac Albert de Mahagi, UNILAC, Faculté des Sciences Agronomiques, BP 33 Mahagi, Ituri, RDC

<sup>4</sup> Université de Dschang, Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles, Département d'Agriculture, Unité de Recherche de Phytopathologie et de Zoologie Agricole, BP 222 Dschang, Cameroun

<sup>5</sup> Université d'Abomey-Calavi (UAC), Faculté des Sciences Agronomiques Département des Sciences et Techniques de Production Végétale, Unité de Nématologie (UNema), 01BP 526 Cotonou, Bénin

<sup>6</sup> Université de Bertoua, ISABEE-Bélabo, Centre d'Expérimentation et de Production, BP 60 Bélabo, Cameroun

(Reçu le 06 Décembre 2024 ; Accepté le 13 Janvier 2025)

\* Correspondance, courriel : [makisolwanga@gmail.com](mailto:makisolwanga@gmail.com)

### Résumé

La dégradation des sols, le stress hydrique et les attaques parasitaires constituent actuellement de sérieuses menaces à la sécurité alimentaire et l'économie paysanne en Afrique subsaharienne. La symbiose rhizobactérienne est de plus en plus proposée comme une alternative à ces contraintes. La diversité et l'abondance des PGPR de principales cultures sont très peu documentées. Cette étude vise à évaluer l'influence des associations culturales sur l'abondance des PGPR sur les bananiers. Une expérimentation et un inventaire des PGPR ont été réalisés dans un gradient d'associations culturales à base de bananiers. Des échantillons de sol et des racines ont été collectés et analysés. Quatre espèces des PGPR ont été identifiées tant sur les bananiers que sur les cultures associées notamment le manioc, le taro, le sorgho et le haricot : *B. flexus*, *K. variicola*, *B. anthracis* et *P. stutzeri*. Ces espèces ont montré de différences significatives de densité ( $10 \pm 11,5$  à  $204,1 \pm 100,3$  UFC/mL). En fonction des modalités d'associations culturales, la densité des PGPR sur les racines de bananiers a varié de  $22 \pm 9,7$  à  $520 \pm 125$  UFC/mL. Elle a été faible en monoculture ( $81,5 \pm 25,1$  UFC/mL) et plus élevée dans les associations culturales quaternaires comportant le manioc ( $500 \pm 150$  UFC/mL) et le taro ( $520 \pm 125$  UFC/mL), avec respectivement 4 et 3 espèces des PGPR. L'abondance des PGPR est influencée par les caractéristiques physico-chimiques de sols, en dépit de leur indifférences vis-à-vis de P, K<sup>+</sup> et Na<sup>+</sup>. La proximité du manioc réduit la fréquence des PGPR sur les bananiers tandis que celle du taro et/ou du sorgho l'augmente.

**Mots-clés :** Rhizosphère, PGPR, biofertilisation, bioprotection, *Bacillus anthracis* *Klebsiella variicola*, et *Pseudomonas stutzeri*.

## Abstract

### Abundance and diversity of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) in banana-based crop associations in North Kivu (DRC)

Soil degradation, water stress and parasitic attacks are currently serious threats to food security and the farming economy in sub-Saharan Africa. Rhizobacterial symbiosis is increasingly being proposed as an alternative to these constraints. The diversity and abundance of PGPRs in major crops are very poorly documented. The aim of this study is to assess the influence of cropping associations on the abundance of PGPRs in banana. An experiment and an inventory of PGPRs were carried out in a gradient of banana-based cropping associations. Soil and root samples were collected and analysed. Four PGPR species were identified on both banana and associated crops, notably cassava, taro, sorghum and beans: *B. flexus*, *K. variicola*, *B. anthracis* and *P. stutzeri*. These species showed significant differences in density ( $10 \pm 11.5$  to  $204,1 \pm 100,3$  CFU/mL). PGPR density on banana roots ranged from  $22 \pm 9,7$  to  $520 \pm 125$  CFU/mL, depending on the type of crop association. It was low in monoculture ( $81,5 \pm 25,1$  CFU/mL) and higher in quaternary cropping associations with cassava ( $500 \pm 150$  CFU/mL) and taro ( $520 \pm 125$  CFU/mL), with 4 and 3 PGPR species respectively. The abundance of PGPR is influenced by the physico-chemical characteristics of the soils, due to their indifference to P, K<sup>+</sup> and Na<sup>+</sup>. Proximity to cassava reduces the frequency of PGPR on banana, while proximity to taro and/or sorghum increases it.

**Keywords :** *Rhizosphere, PGPR, biofertilization, bioprotection, Bacillus anthracis Klebsiella variicola, et Pseudomonas stutzeri.*

## 1. Introduction

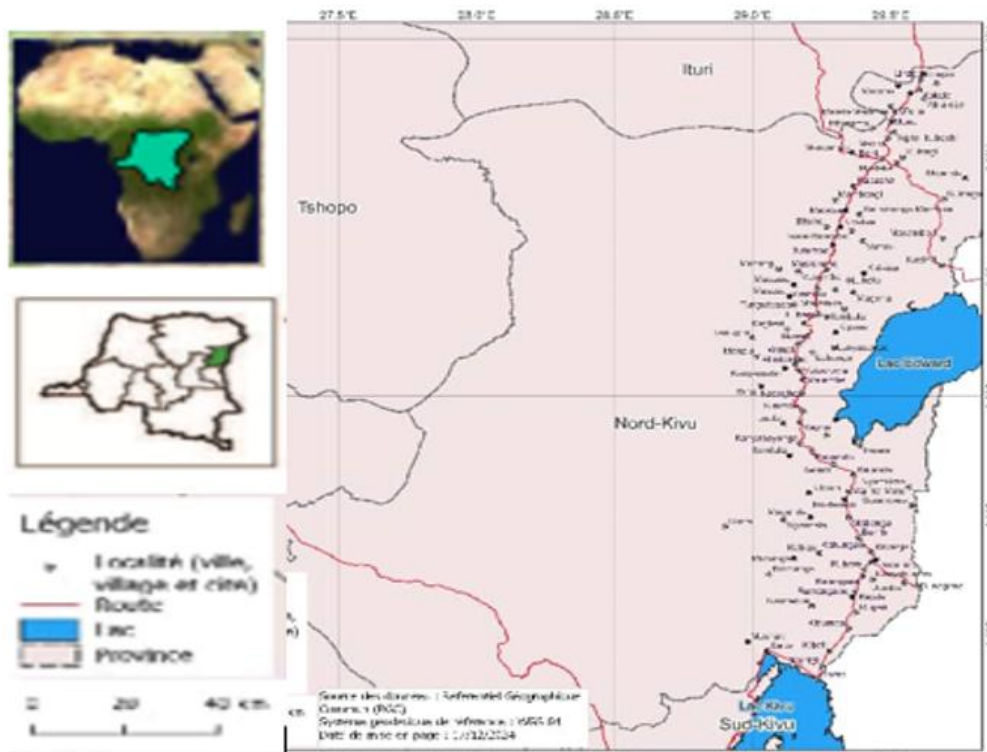
L'une des particularités de plantes est leur immobilité sur le sol. Contrairement aux animaux, elles ne peuvent jamais fuir les facteurs du milieu qui menacent leur survie. Ainsi, les cultures sont souvent soumises à des stress biotiques (maladies et ravageurs) et abiotiques (sécheresse, carences nutritionnelles, etc.), qui compromettent sérieusement leur production [1]. Or, la dégradation des sols [2] et la récurrence des attaques parasitaires sur les cultures [3] figurent parmi les principales menaces écologiques à la survie des populations pauvres des pays où les terres cultivables sont en diminution pendant que la croissance démographique demeure sans cesse galopante. Le Nord-Kivu (RDC) est l'une des régions qui vit parfaitement cette réalité. La surexploitation des sols et la taille réduite des exploitations agricoles dues au surpeuplement caractérisent son agriculture [4], expliquant en grande partie la pauvreté paysanne qui en résulte. En raison de la faible accessibilité aux engrais et aux pesticides chimiques dues à leurs coûts élevés et leur faible disponibilité dans cette région, les rendements de cultures demeurent faibles. Dans la majorité des ménages tant urbains que ruraux, la famine et la misère sont quasi endémiques, avec d'énormes risques de devenir dramatiques dans un avenir proche, si des mesures idoines ne sont pas prises pour le moment. Depuis quelques années, l'usage des intrants chimiques en agriculture a été remis en cause au vu de leurs effets délétères sur la qualité des sols [5], les risques sanitaires [6] et surtout des perturbations de cycles naturels des nutriments et l'atteinte aux microorganismes du sol [7]. De ce fait, il apparaît utopique de miser sur leur utilisation pour espérer augmenter la production agricole. Bien plus, de fréquents épisodes de sécheresse suffiraient pour anéantir les effets de la fertilisation coûteuse, qui de surcroît, aggraverait la dégradation avancée des sols, hormis l'érosion financière. L'amélioration des sols constitue un challenge pour le bien-être humain et la croissance économique [8]. Nombreux travaux ont présenté les amendements organiques comme une option efficace de lutte contre la dégradation des sols. Cependant, leur utilisation se heurte encore à de nombreuses contraintes socio-économiques dont le coût élevé de transport et surtout leur indisponibilité [9]. Les aménagements

agricoles à l'instar de systèmes agroforestiers et de cultures en couloirs de haies d'espèces au potentiel élevé de fertilisation des sols comme le *Tithonia* sp., *Leucaena* sp., *Calliandra* sp., *Flemingia* sp., etc., ne rencontrent pas encore d'échos favorables auprès des agriculteurs, en raison de l'exiguïté de leurs exploitations [10]. Face à ces problèmes, les pistes les plus prometteuses devront reposer sur le renforcement des capacités défensives naturelles des plantes [11]. Dans cette optique, seules les associations culturales ont rencontrées les intérêts paysans. Comparé à la monoculture, les associations culturales offrent l'avantage de diversifier les récoltes dans les petites exploitations agricoles pour assurer la sécurité alimentaire et minimiser le risque lié à une mauvaise récolte, en plus d'économiser la main d'œuvre et accroître les revenus [12]. Par ailleurs, les associations culturales ont permis de réduire la pression parasitaire sur les cultures et de promouvoir l'installation et le développement des agents de biocontrôle [13]. Aussi, maints travaux ont démontré le rôle clé des microorganismes du sol dans l'alimentation, la croissance et la protection des plantes contre les menaces parasites [9]. Parmi ces microorganismes se retrouvent les PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*). Ceux-ci colonisent efficacement la rhizosphère et impactent sur la croissance des plantes par divers mécanismes directs ou indirectes tels que la solubilisation des nutriments (P, K et Zn), la production de sidérophores, la fixation de l'azote et la production de phytohormones [13 - 15]. Les bananiers figurent parmi les cultures de grande importance socio-économique en région de Grands Lacs africains, et particulièrement au Nord-Kivu où leur productivité est souvent compromise par les carences minérales des sols, la récurrence des épisodes de sécheresse et le parasitisme. De l'avis de nombreux spécialistes, ils devront, à l'instar de toutes les cultures vivrières de grande prédilection alimentaire, bénéficier des progrès biotechnologiques d'inoculations artificielles des PGPR [2, 16, 17]. En dépit des atouts et des opportunités que les PGPR peuvent offrir au Nord-Kivu, aucune étude n'y a jusque-là porté sur leur inventaire tant sur les bananiers que sur les cultures associées. Cette étude vise à contribuer à l'amélioration de la productivité et de la durabilité des bananeraies à travers l'exploitation ultérieure de la symbiose rhizobactérienne. Plus spécifiquement, il vise à inventorier et évaluer la densité des espèces de PGPR sur les bananiers et sur les cultures associées. Ensuite, évaluer l'influence des modalités d'associations culturales sur l'abondance et la diversité des PGPR mais également leurs réponses vis-à-vis propriétés physico-chimiques de sols. A cet effet, deux questions retiennent notre attention : Les modalités et les niveaux d'associations culturales influent-elles sur la densité et l'abondance des PGPR dans la rhizosphère des bananiers? Les propriétés physico-chimiques de sols les affectent-elles?

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Milieu d'étude

La Province du Nord-Kivu (*Figure 1*) est située à l'Est de la RDC et à cheval de l'équateur, entre 0° 58' de latitude Nord et 2° 03' de latitude Sud et entre 27° 14' de longitude Ouest et 29° 58' de longitude Est. Avec une superficie de 59.631 Km<sup>2</sup>, cette province compte plus de 9 millions d'habitants, avec une densité de plus de 100 habitants par Km<sup>2</sup>. Le relief du Nord-Kivu est très hétérogène permettant de définir trois zones agroécologiques: les zones de basse altitude (< 1000 m) avec une température de 23 - 27 °C, de moyenne altitude (1000-1850 m) où on enregistre environ 17-19 °C et de haute altitude (> 1850 m), 11 - 15 °C [4].



**Figure 1 :** Carte administrative du Nord-Kivu avec les territoires et des villes (MiniPro de plan, 2017)

La pluviométrie moyenne varie entre 1.000 mm et 2.000 mm. Les précipitations mensuelles les plus faibles sont enregistrées entre janvier et février et entre juillet et août. Bien qu'actuellement sujette à des changements climatiques, le Nord-Kivu reçoit des pluies étalées sur toute l'année. Le Nord-Kivu s'étend sur une diversité de sols : volcaniques récents vers le sud ; des intrusions granitiques à l'Est et au Nord et de sols humifères dans la forêt vers l'Ouest [4].

## 2-2. Matériel

Au cours de la présente étude, deux catégories de matériel ont été utilisées : le matériel biologique constitué de souches de bananiers, des cultures associées et des PGPR. Le matériel non-biologique constitué des outils aratoires ainsi que des équipements et réactifs de laboratoires tant pour les analyses des sols que pour l'extraction et l'identification des PGPR.

## 2-3. Méthodes

### 2-3-1. Conduite de l'essai

Un essai a été conduit suivant un dispositif expérimental de trois blocs complets randomisés de 10 traitements. Ces derniers portaient sur les modalités les plus fréquentes d'associations culturelles des bananiers (*Tableau 1*).

**Tableau 1 : Associations culturelles en expérimentation**

Traitements	Modalités d'associations culturelles	Niveau d'association
Monoban	Monoculture des bananiers	Monoculture
Harban	Bananiers + Haricot	Association binaire
Manban	Bananiers + Manioc	Association binaire
Tarban	Bananiers + Taro	Association binaire
Maharban	Bananiers + Manioc + Haricot	Association ternaire
Taharban	Bananiers + Taro + Haricot	Association ternaire
Tasoban	Bananiers + Taro + Sorgho	Association ternaire
Masoban	Bananiers + Manioc + Sorgho	Association ternaire
Tasoharban	Bananiers + Taro + Sorgho + Haricot	Association quaternaire
Masoharban	Bananiers + Taro + Sorgho + Haricot	Association quaternaire

Chaque bloc expérimental comportait des parcelles portant une monoculture, trois associations binaires, quatre associations ternaires et deux associations quaternaires. Pendant que les parcelles étaient séparées entre elles par des sentiers de 4 m de largeur, les blocs quant à eux par des sentiers de 6 m. Chaque association culturelle a été affectée dans une parcelle de 250 m<sup>2</sup> de manière à contenir 16 souches de bananiers aux écartements de 4 m\* 4 m. Quant aux cultures associées, elles étaient installées aux écartements de 30 cm en tous sens pour le haricot, 75 cm pour le manioc et 1m pour le sorgho et le taro.

**2-3-2. Collecte des échantillons, extraction et identification des PGPR**

Les observations ont porté sur les propriétés physico-chimiques de sols et la symbiose rhizobactérienne aussi bien de bananiers que de cultures associées. Ainsi, les échantillons étaient constitués de racines prélevées sur les souches de bananiers et des plants de chaque culture associée, en tenant compte des effets de bordure. Par ailleurs, un échantillon composite de sols a été prélevé dans chaque parcelle. Une partie des échantillons de sol a été utilisée pour l'analyse des propriétés physico-chimiques des sols sous les différentes modalités d'association au laboratoire d'analyse des sols et produits agro-alimentaires (LASPA) de l'institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU). Outre l'analyse granulométrique, le pH, la conductivité électrique, le carbone organique, l'azote total, le phosphore assimilable ont été respectivement déterminés suivant les normes NF ISO 10390, 11265, 14235, 11261 et 11263. Le potassium échangeable, le calcium échangeable et le magnésium échangeable ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique (Norme NF X31-108). La capacité d'échange cationique a été déterminée par la méthode à l'acétate d'ammonium (Norme NF X 31-130). Ces analyses ont été précédées d'un prétraitement qui a consisté à un séchage à l'air libre, broyage manuel et au tamisage (Norme NF ISO 11464). L'extraction des PGPR dans les échantillons des sols de la rhizosphère et des racines des plantes, a été effectuée sur la Gélose nutritive selon la méthode décrite par Pegnoo *et al.* (2006) conformément au protocole de Sang-Woo *et al.* (2010). Pour ce faire, 1 mL de la solution d'extraction a été étalé à la surface de la gélose contenue dans les boîtes de Pétri, qui ont été soumises à l'incubation à 28±2°C durant 48 heures. Le dénombrement des colonies des PGPR s'est effectué sur la gélose PCA (Plate Count Agar). Leur identification a été faite à l'aide des analyses biomoléculaires au laboratoire Macrogen Europe à Amsterdam Pays Bas.

**2-3-3. Paramètres analysés**

Les données ont permis de déterminer quelques indices écologiques des PGPR. La composition spécifique a été définie par la liste des espèces recensées tandis que la richesse spécifique a été déterminée par le nombre d'espèces dans l'ensemble des relevés. La densité qui correspond au nombre de colonies d'une espèce dans un échantillon. L'abondance relative qui correspond à la moyenne des densités des échantillons dans

lesquels une espèce a été retrouvée. Ainsi, elle a été calculée par  $A = n_i/N$ , où  $n_i$  est le nombre de colonies d'une espèce et  $N =$  nombre total des colonies. La fréquence d'occurrence de chaque espèce a été calculée par  $FO = n_i/N$ , où  $n_i$  est le nombre de relevés dans lequel l'espèce  $i$  est présente et  $N$  le nombre total de relevés. Cinq classes d'espèces ont été définies : les omniprésentes ( $FO = 100\%$ ); les constantes ( $75\% \leq FO < 100\%$ ); les régulières ( $50\% \leq FO < 75\%$ ); les accessoires ( $25\% \leq FO < 50\%$ ) et les accidentelles ( $5\% \leq FO < 25\%$ ).

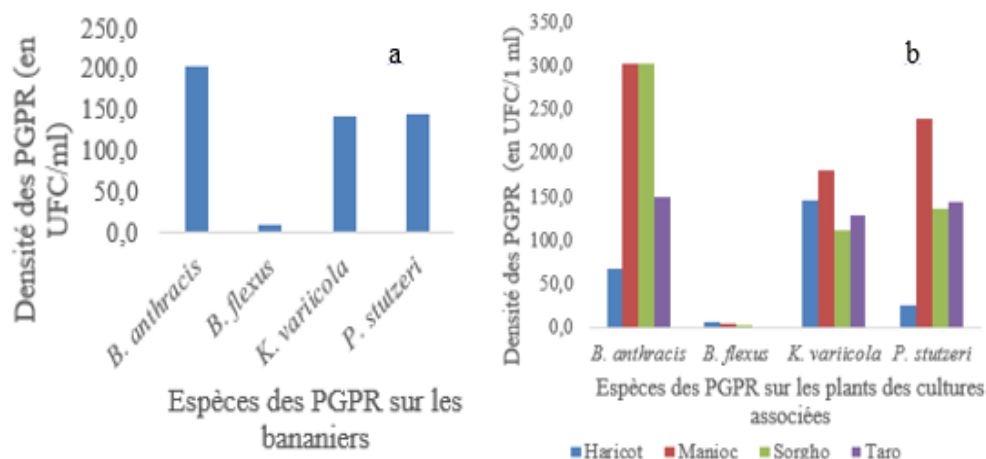
### 2-3-4. Analyses statistiques des données

Les données ont été analysées par les méthodes classiques de comparaison dont l'analyse de la variance (ANOVA) et les moyennes ont été comparées avec le test HSD Turkey au seuil de signification de 5%. La réalisation de ces statistiques s'est effectuée à l'aide du logiciel PAST version 2.15. Les interactions entre les PGPR et les paramètres environnementaux dont les propriétés physico-chimiques du sol et les cultures hôtes ont été évaluées par l'analyse canonique des correspondances (ACC).

## 3. Résultats

### 3-1. Identification, diversité et densité des PGPR

L'étude a révélé la présence de quatre espèces des PGPR sur les plants des bananiers et les cultures associées à savoir *Bacillus flexus*, *Klebsiella variicola*, *Bacillus anthracis* et *Pseudomonas stutzeri* (**Figure 2**). Ces espèces sont réparties dans trois genres, trois Familles (Bacillaceae, Enterobacteriaceae, Pseudomonaceae respectivement), trois ordres (Bacillales, Enterobacteriales, Pseudomonadales respectivement), deux classes qui sont respectivement Bacilli et Gammaproteobacteriales. La densité des PGPR varie de  $10 \pm 11,5$  à  $204,1 \pm 100,3$  UFC/mL (**Figure 2**) et montre de différences significatives entre les espèces ( $p = 0,00163$ ). *B. anthracis* est la plus dominante et *B. flexus* la plus rare (**Tableau 2**). Par ailleurs, il n'existe pas de différences significatives de densités des PGPR entre les cultures ( $p = 0,508$ ).



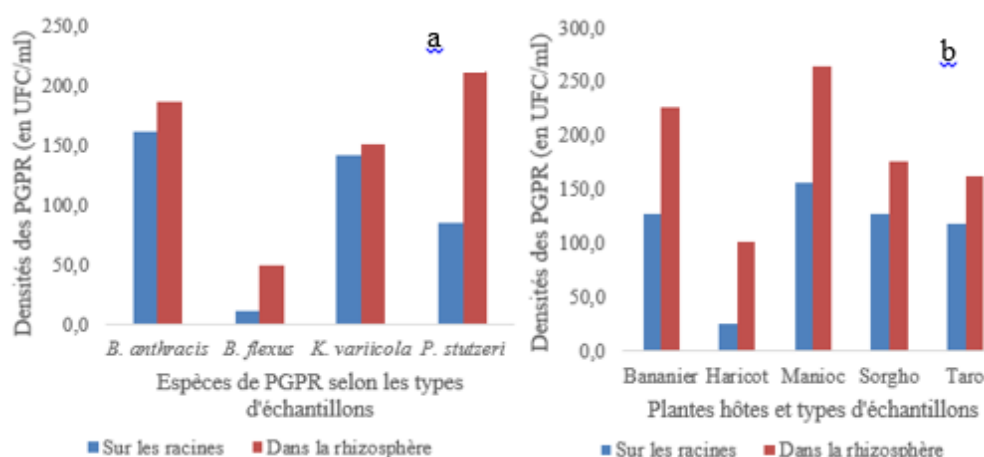
**Figure 2** : Densité des PGPR sur les bananiers (a) et les cultures associées (b)

**Tableau 2 :** Comparaisons deux à deux des densités de PGPR sur les bananiers

	<i>B. anthracis</i>	<i>B. flexus</i>	<i>K. variicola</i>	<i>P. stutzeri</i>
<i>B. anthracis</i>	0			
<i>B. flexus</i>	6,75*	0		
<i>K. variicola</i>	2,11	4,64*	0	
<i>P. stutzeri</i>	2,08	4,67*	0,02	0

Les différences des moyennes (*q*) suivies de \* sont significatives ( $q > q_{crit} = 3.82$ )

Par rapport aux types d'échantillons (**Figure 3**), la densité des PGPR est plus élevée dans la rhizosphère ( $596,6 \pm 70,6$  UFC/mL) que sur les racines ( $399,1 \pm 67$  UFC/mL). Cependant, les différences ne sont pas significatives ( $p = 0,079$ ).

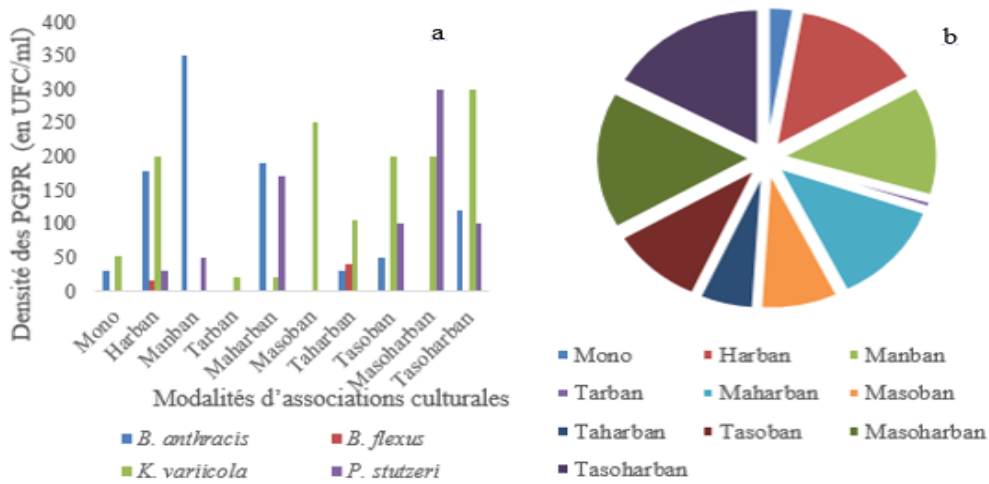


**Figure 3 :** Densité des PGPR selon les échantillons en fonction des espèces (a) et les plantes hôtes (b)

### 3-2. Abondance et diversité des PGPR selon les associations culturales

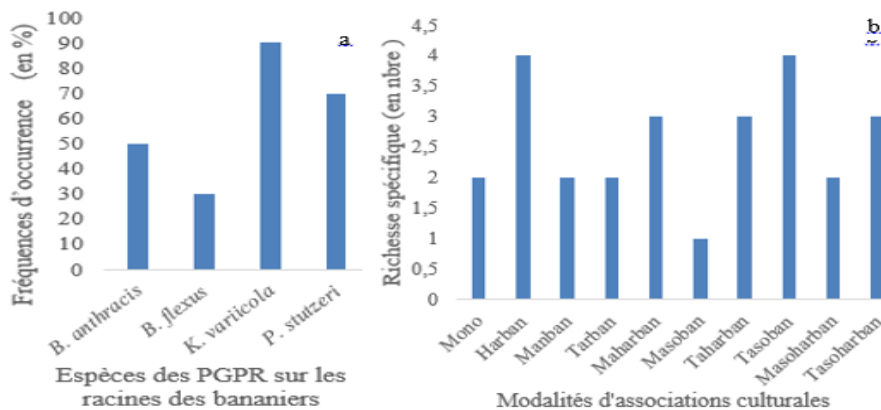
#### 3-2-1. Abondance et diversité des PGPR selon les modalités d'associations culturales

La densité des PGPR sur les racines de bananiers varie de  $22 \pm 9,7$  à  $520 \pm 125$  UFC/mL en fonction des modalités d'associations culturales (**Figure 4**). Elle est faible en monoculture ( $81,5 \pm 25,1$  UFC/mL) ainsi que dans l'association binaire Bananiers + Taro ( $22 \pm 9,7$  UFC/mL) et plus élevée dans les associations culturales quaternaires comportant le manioc ( $500 \pm 150$  UFC/mL) et le taro ( $520 \pm 125$  UFC/mL). Ainsi, la densité des PGPR sur les racines de bananiers a augmenté avec la complexification des associations culturales. Cependant, elle ne montre pas de différences significatives entre les modalités d'associations culturales ( $p = 0.735$ ).



**Figure 4 :** Densité (a) et abondance (b) des PGPR sur les racines des bananiers selon les modalités d'associations culturelles

Par rapport aux fréquences d'occurrence des espèces des PGPR au sein de modalités des associations culturelles (Figure 5a), *B. flexus* se révèle une espèce accessoire contrairement aux espèces *K. variicola*, *B. anthracis* et *P. stutzeri* qui sont constantes (avec 80 à 90 % de fréquences d'occurrence).



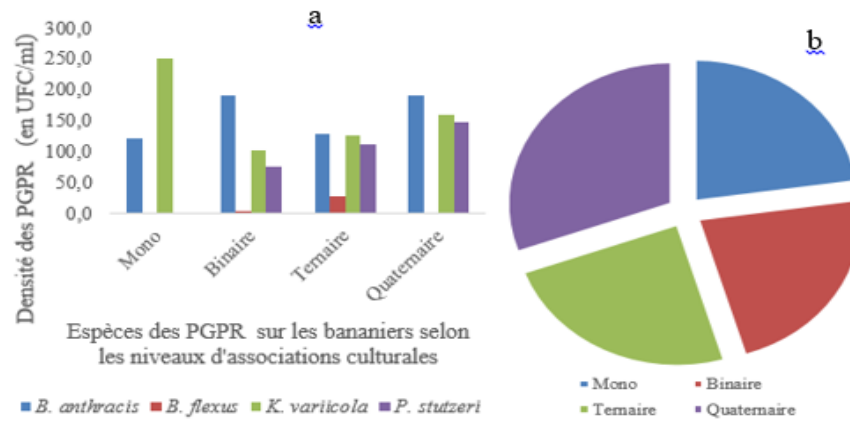
**Figure 5 :** Fréquences d'occurrence des espèces des PGPR sur les bananiers (a) et richesse spécifique des modalités d'associations culturelles en PGPR (b)

Quant à la richesse spécifique, elle a varié de 1 à 4 espèces (Figure 5b), la monoculture et les associations binaires comportant le manioc et le taro n'ont hébergé que 2 espèces des PGPR pendant que la plupart des associations ternaires et quaternaires en hébergent respectivement 4 et 3 espèces des PGPR. Ainsi, l'abondance et la diversité des PGPR sur les bananiers s'accroissent légèrement avec les niveaux d'associations culturelles. Cependant, leur complexification au-delà d'un certain seuil, peut les réduire.

**3-2-2. Abondance et diversité des PGPR selon les niveaux d'associations culturelles**

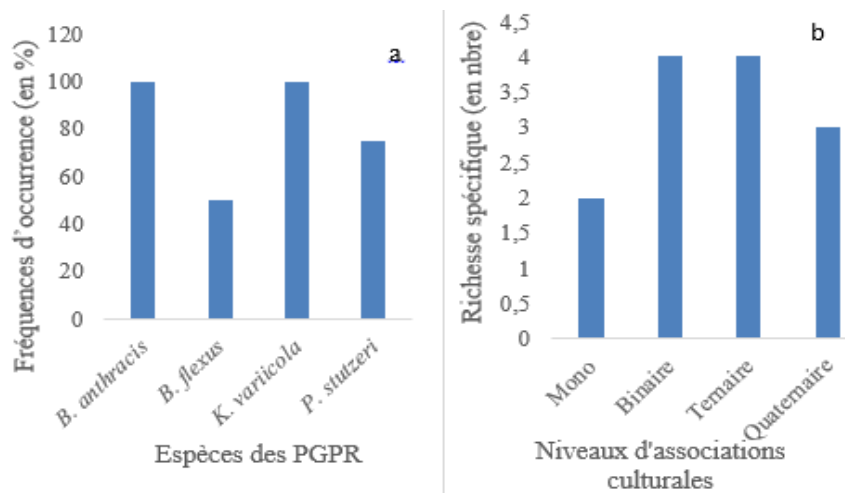
La densité des PGPR sur les racines de bananiers varie de  $368 \pm 77,6$  à  $496,7 \pm 84,7$  UFC/mL en fonction des niveaux d'associations culturelles (Figure 6a). Elle est faible en monoculture et plus élevée dans les associations culturelles quaternaires. La densité des PGPR a augmenté avec la complexification des associations culturelles. Cependant, l'abondance des espèces des PGPR (figure 6b) ne montre pas des différences significatives entre les niveaux d'associations culturelles ( $p = 0,943$ ).





**Figure 6 :** Densité (a) et abondance (b) des PGPR sur les racines des bananiers selon les niveaux d'associations culturelles

Par rapport aux fréquences d'occurrence des espèces des PGPR (Figure 7a), *B. flexus* et *P. stutzeri* se révèle une espèce régulières au sein de niveaux d'associations culturelles, contrairement aux espèces *K. variicola* et *B. anthracis* qui sont omniprésentes.



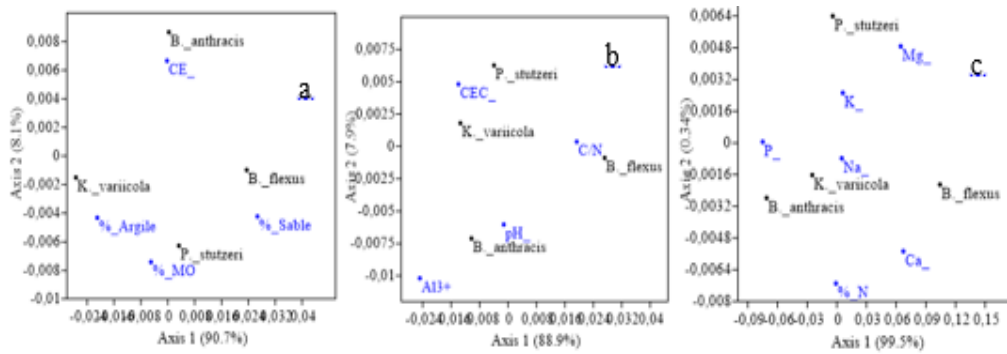
**Figure 7 :** Fréquences d'occurrence des espèces des PGPR sur les bananiers (a) et richesse spécifique des niveaux d'associations culturelles en PGPR (b)

Quant à la richesse spécifique, elle a varié de 2 à 4 espèces en fonctions de niveaux d'associations culturelles (Figure 7b). La monoculture est relativement peu riche que les associations binaires qui hébergent 3 à 4 espèces des PGPR Autrement dit, l'abondance et la diversité des PGPR sur les bananiers s'accroissent légèrement avec les niveaux d'associations culturelles.

### 3-3. Influence des caractéristiques agroécologiques sur l'abondance et la diversité des PGPR au sein des associations culturelles

#### 3-3-1. Réponses des PGPR aux caractéristiques physico-chimiques de sols

L'abondance des espèces des PGPR est nettement influencée par les caractéristiques physico-chimiques de sols : *B. flexus* subit une plus grande influence positive du Sable, *K. variicola* et *P. stutzeri* en subissent celles de l'Argile et de la matière organique et *B. anthracis*, celle de la conductivité électrique (Figure 8a).

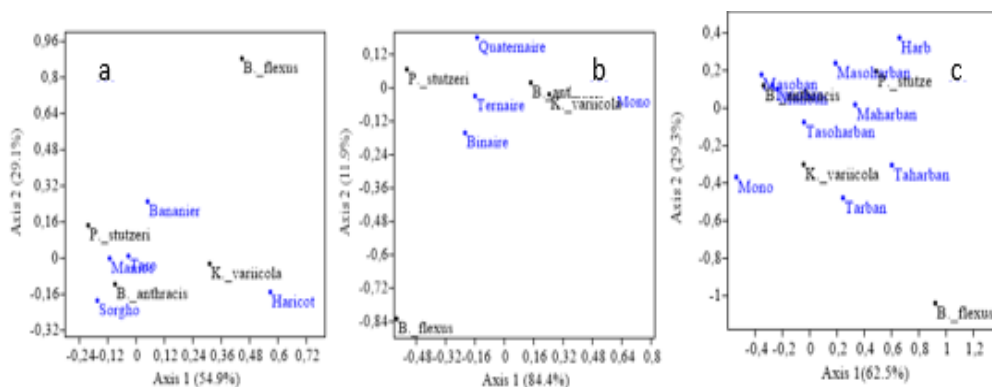


**Figure 8 :** Abondance des PGPR selon les caractéristiques physico-chimiques des sols

Sur plan chimique, l'acidité (actuelle et aluminique) des sols affecte positivement *B. anthracis* tandis que la CEC l'est pour *K. variicola* et *P. stutzeri*. Par contre, *B. flexus* est nettement affecté par C/N et  $Ca^{++}$  pendant que *P. stutzeri* l'est par le  $Mg^{++}$  (**Figure 8b**). Enfin, P,  $K^+$  et  $Na^+$  se révèlent sans influence sur les PGPR, alors que *P. stutzeri* semble indifférent de tous les sels et cations des sols (**Figure 8c**). Ainsi, une fumure organique peut stimuler la symbiose rhizobactérienne sur les bananiers avec tous ses effets bénéfiques sur la bioprotection contre les stress biotiques et abiotiques.

### 3-3-2. Réponses de l'abondance des PGPR des bananiers aux associations culturales

Le taro et le manioc se révèlent indifférents vis-à-vis des PGPR et *P. stutzeri* l'est vis-à-vis des cultures. Par contre, *B. anthracis* est fortement associé au sorgho, *K. variicola* au haricot et *B. flexus* aux bananiers (**Figure 9a**). Par rapport aux niveaux d'associations culturales (**Figure 9b**), *B. anthracis* et *P. stutzeri* s'en révèlent indifférents tandis que les associations ternaires les sont vis-à-vis des PGPR. Cependant, *P. stutzeri* est plus favorisé dans les associations quaternaires et la monoculture, tandis que *B. flexus* l'est dans les associations binaires.



**Figure 9 :** Abondance des PGPR sur les bananiers selon les cultures associées (a), les niveaux (b) modalités (c) d'associations culturales

Quant aux modalités d'associations culturales (**Figure 9c**), l'association quaternaire comportant le taro s'en est révélée indifférente tandis que toutes les associations culturales comportant le manioc ont été plus favorables à *P. stutzeri* et *B. anthracis*, autant que l'association binaire comportant le haricot. Par contre, les associations binaires et ternaires comportant le taro ont été plus favorables à *B. flexus* et *K. variicola*. Ainsi, les associations ternaires et quaternaires comportant le taro semblent plus bénéfiques pour capitaliser les fonctions écologiques de la symbiose rhizobactérienne sur les bananiers.

### 3-3-3. Abondance des PGPR sur les bananiers en fonction de celle des plantes hôtes des associations culturales

Le manioc abrite plus des PGPR que le taro et le sorgho. Cependant, la symbiose rhizobactérienne du manioc impacte moins celle des bananiers par rapport au sorgho et au taro (Figure 10). Ainsi, en vue de mieux capitaliser le potentiel biofertilisant et bioprotecteur des PGPR sur les bananiers, le sorgho et le taro sont à intégrer dans les associations culturales. En revanche, l'intégration du manioc dans les associations culturales à base des bananiers est à éviter.

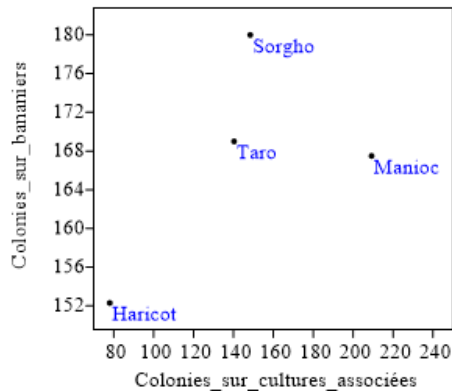


Figure 10 : Symbiose rhizobactérienne des PGPR des bananiers en fonction de celles de plantes hôtes en associations culturales

## 4. Discussion

Quatre espèces des PGPR ont été identifiées sur les bananiers et les cultures associées notamment le manioc, le taro, le sorgho et le haricot qui sont *B. flexus*, *K. variicola*, *B. anthracis* et *P. stutzeri*. Ce qui corrobore les résultats de quelques travaux qui ont également observé sur les bananiers *Serratia mercenscens*, *Pseudomonas fluorescens* et *Bacillus thuringiensis* [18], *Rhizobium*, *Pseudomonas*, et *Bacillus* sur les fèves [19], *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp et *Azospirillum* spp sur le maïs [2]. L'abondance et la diversité des PGPR tant sur les bananiers que sur les cultures associées ont été indifférentes des niveaux et des modalités d'associations culturales. Par ailleurs, *K. variicola*, *B. anthracis* et *P. stutzeri* ont été omniprésents ou réguliers sur toutes les cultures associées aux bananiers et dans tous les niveaux d'associations culturales, contrairement à *B. flexus* qui a été accessoire dans quelques associations. Ces résultats divergent de ceux de nombreuses études qui indiquent que l'abondance et la diversité de la communauté rhizobactérienne dépendent des plantes hôtes et sont dues à plusieurs caractères associés aux interactions racine-rhizobactérie [20]. La dépendance est essentiellement due à la différence entre les espèces de plantes hôtes, du profil et de l'architecture de leurs racines, et surtout de leur rhizodéposition (des exsudats, des diffusats, des lysats, des mucilages, et composés organiques émis à travers des cellules détachées de la racine). Ces facteurs modulent considérablement l'écologie rhizosphérique et l'efficacité des PGPR [21, 22] et le fonctionnement de la coopération entre PGPR et plante varie selon les espèces aussi bien des PGPR que de plante hôte [23, 24]. Ainsi, la divergence entre les résultats de la présente à ceux des autres études est attribuable à la dégradation avancée des sols du Nord-Kivu due à leur exploitation continue. Les espèces *B. anthracis*, *P. stutzeri* et *K. variicola* se sont révélées omniprésentes tant sur les plantes hôtes que dans les modalités d'associations culturales. Plusieurs travaux corroborent ces résultats obtenus. Leur abondance et fréquence d'occurrence peut s'expliquer par leur grande capacité à coloniser la rhizosphère ainsi que les racines des

plantes, elles sont capables de former des associations intimes avec diverses plantes hôtes. Leur ubiquité les classe parmi les meilleurs candidats PGPR [25]. Leur omniprésence dominante peut également s'expliquer par leur coévolution longue et intime durant laquelle ils ont appris à diriger leur hôte ou, à l'inverse, les plantes ont découvert comment percevoir la communication microbienne dans la rhizosphère [26]. Au sein de la rhizosphère, à travers des signaux divers et variés, se déroule une communication bidirectionnelle constante entre la plante et les PGPR afin de moduler la composition et l'activité des communautés qui les entourent. L'abondance et la diversité des PGPR ont été nettement influencées par les caractéristiques physico-chimiques des sols. Plusieurs travaux ont reconnu que le pH et la teneur de certains éléments minéraux du sol (Ca, K, Al, Na) sont considérés comme les plus importants facteurs influençant la structure de la communauté microbienne [27]. Cette influence peut expliquer la dépendance des potentiels biofertilisant et bioprotecteur des PGPR vis-à-vis des propriétés physico-chimiques des sols, en dépit de leur naturelle présence permanente dans le sol [28]. La corrélation directe de l'abondance et de la diversité des PGPR est reconnue avec le pH, la capacité de fixation de l'azote et de solubilisation tant du phosphore que du Potassium, les mécanismes des sidérophores ne sont actifs que sous faible disponibilité de ces éléments dans le sol [15, 29].

## 5. Conclusion

La présente étude a permis de reconnaître en région de Beni (Nord-Kivu, RDC), l'existence de quatre espèces des PGPR sur les bananiers, le manioc, le taro, le sorgho et le haricot. Il s'agit de *K. variicola*, *B. anthracis* et *P. stutzeri* parmi les plus dominants et réguliers et *B. flexus* qui s'est révélé une espèce accessoire. Bien que les niveaux et les modalités d'associations culturales n'aient pas exercé d'influences significatives sur l'abondance et la diversité des PGPR, les bananiers au sein des associations culturales ternaires comportant le taro au côté du sorgho ont connu la symbiose rhizobactérienne plus intense. Enfin, bien que le P, K<sup>+</sup> et Na<sup>+</sup> se soient révélés sans influence sur les PGPR, l'abondance des espèces des PGPR a été nettement influencée par les caractéristiques de sols. Toutefois, *P. stutzeri* a été indifférent de tous les cations des sols.

## Références

- [1] - M. GRIFFON, "Eléments théoriques en Agroécologie : l'intensivité écologique". *OCL.*, 24 (2017) 3 D302
- [2] - A. ADJANOHOUN, L. S. BABA-MOUSSA, G. DAGBENONBAKIN, A. SAÏDOU and F. TOUKOUROU, "Utilisation des microorganismes du sol pour accroître la productivité agricole : Manuel de l'apprenant", CNS Maïs/INRAB/SNRA, (2017) 76 p.
- [3] - FAO/AIEA, "Manuel d'amélioration des plantes par mutation " Ed. Vienne, FAO, (2020)
- [4] - MINPRO DE PLAN, "Localisation des Objectifs de développement durable dans le Nord-Kivu", Rapport provincial, OCDD - RD Congo, Goma, (2017) 152 p.
- [5] - Y. FILLATRE, J. BAUDRY and A. ALIGNIER, "Effet de l'hétérogénéité des paysages agricoles sur la diversité des communautés végétales", 7<sup>èmes</sup> Journées Françaises d'Ecologie du Paysage, Dijon, France, (2014) 47 p.
- [6] - FAO & PNUE, "Convention de Rotterdam sur la procédure de consentement préalable en connaissance de cause applicable à certains produits chimiques ", Ed. Nations Unies, UNEP/FAO/RC/CC.2/12/Add.1, (2017) 13 p.
- [7] - S. SIVASAKTHI, D. KANCHANA, G. USHARANI and P. SARANRAJ, *Int. J. Microbiol.*, Vol. 4, 3 (2013) 227 - 233
- [8] - B. BEKUNDA, N. SANGINGA and P. L. WOOMER, *Advances in Agronomy.*, 108 (2010) 184 - 236
- [9] - A. MALTAS, R. CHARLES and S. SINAJ S., *Recherche Agronomique Suisse*, 2, 3 (2011) 120 - 127

- [10] - M. J. P. MATE, "Croissance, phytomasse et minéralomasse des haies des légumineuses améliorantes en cultures en allées à Kisangani (République Démocratique du Congo)". Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, (2011) 235 p.
- [11] - A. A. GUST, F. BRUNNER and T. NURNBERGER, *Current Opinion in Biotechnology*, 21 (2010) 204 - 210
- [12] - S. DELSTANCHE, " Drivers of soil fertility in smallholder banana systems in the African Great Lakes Region", Thesis, Université Catholique de Louvain, (2011) 458 p.
- [13] - G. M. GURR, S. D. WRATTEN, D. A. LANDIS and M. YOU M., *Annu. Rev. Entomol.*, 62 (2017) 91 - 109
- [14] - M. G. A. HEIJDEN, R. D. BARDGETT and N. M. STRAALLEN, *Ecology Letters*, 11 (2008) 296 - 310
- [15] - O. C. KENNETH, *Int. J. Adv. Res. Biol. Sci.*, 4, 5 (2017) 123 - 142
- [16] - M. OROZCO-MOSQUEDA, A. FLORES, B. ROJAS-SÁNCHEZ, C. A. URTIS-FLORES, L. R. MORALES-CEDENO, M. F. VALENCIA-MARIN, S. CHÁVEZ-AVILA, D. ROJAS-SOLIS and G. SANTOYO, *Agronomy.*, 11 (2021) 1167
- [17] - G. GUPTA, S. S. PARIHAR, N. K. AHIRWAR, S. K. SNEHI and S. SINGH, *J. Microb. Biochem. Technol.*, 7, 2 (2015) 096 - 102
- [18] - A. AHMED, I. FATMA, M. HOWAIDA, M. LABIB and M. I. HEGAZY, *Zagazig J. Agric. Res.*, 51, 4 (2024) 727 - 743
- [19] - D. R. SOLÍS, E. S. ZETTER, M. C. PÉREZ, M. C. R. GRANADOS, L. M. RODRÍGUEZ et G. SANTOYO, *Biocatal Agric Biotechnol*, 13 (2018) 46 - 52
- [20] - A. VENIERAKI, M. DIMOU, P. PERGALIS, I. KEFALOGIANNI, I. CHATZIPAVLIDIS and P. KATINAKIS, *Microbial Ecology.*, 61, 2 (2011) 277 - 285
- [21] - Y. V. KUZMICHEVA, A. I. SHAPOSHNIKOV, S. N. PETROVA, N. M. MAKAROVA, I. L. TYCHINSKAYA, J. V. PUHALSKY, N. V. PARAHIN, I. A. TIKHONOVICH and A. A. BELIMOV, *Plant and Soil*, 419 (2017) 83 - 96
- [22] - S. BEYER, S. DABA, P. TYAGI, H. BOCKELMAN, G. BROWN-GUEDIRA and M. MOHAMMADI, *Functional & Integrative Genomics.*, 19 (2019) 91 - 107
- [23] - R. K. BEHL, S. RUPPEL, E. KOTHE and N. NARULA, *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 81 (2012) 95 - 109
- [24] - B. DROGUE, H. SANGUIN, A. CHAMAM, M. MOZAR, C. LAURO, O. PANAUD, C. PRIGENT-COMBARET, N. PICAULT and D. WISNIEWSKI, *Front. Plant Sci.*, 5 (2014) 607 - 619
- [25] - M. F. V. DELGADO, E. D. V. RODRÍGUEZ, L. A. C. CHÁVEZ, M. I. E. ALVARADO, F. I. P. COTA et S. S. VILLALOBOS, *Rev Mex Fitopatol*, 36 (2018) 95 - 130
- [26] - A. MSIMBIRA, S. LEVINI and L. DONALD, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 106 (2020) 4 - 13
- [27] - V. VENTURI and C. KEEL, *Trends in Plant Science*, 21 (2020) 187 - 198
- [28] - C. ALABOUVETTE and C. CORDIER, *Innovations Agronomiques.*, 69 (2018) 61 - 70
- [29] - M. HARRIET, "Implication des microARNs dans la communication plante-microbiote rhizosphérique", Thèse de doctorat, Biologie végétale, Université de Rennes, (2023) 185 p.