

Article de Recherche

Abondance et diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules dans les associations culturales à base de bananiers au Nord-Kivu (République Démocratique du Congo)

TOTO MAKISO LWANGA^{1,2,3,4*}, VICTOR JOLY DZOKOU^{4,5}, ANTOINE AFFOKPON⁶ et JOSEPH DJEUGAP FOVO^{4*}

¹Institut Supérieur de Développement Rural (ISDR-Beni), Section Développement Rural, BP 177 Beni (Nord-Kivu, RDC)

²Université Officielle de Semuliki (U.O.S-Beni), Faculté des Sciences Agronomiques, BP 48 Beni (Nord-Kivu, RDC)

³Université du Lac Albert de Mahagi (UNILAC) Faculté des sciences Agronomiques, BP 33 Mahagi (Ituri, RDC)

⁴Université 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

⁵Université de Bertoua, ISABEE-Bélabo, Centre d'Expérimentation et de Production, BP 60 Bélabo, Cameroun

⁶Université d'Abomey-Calavi (UAC), Faculté des Sciences Agronomiques Département des Sciences et Techniques de Production Végétale, Unité de Nématologie (UNema), 01 BP 526 Cotonou, Benin

* Correspondance: makisolwanga@gmail.com, jdjeugapfovo@yahoo.fr

Reçu: 06 mars 2025, Revu: 08 avril 2025, Révisé: 16 avril 2025, Accepté: 26 avril 2025, Publié: 16 juin 2025

RÉSUMÉ

Le changement climatique, la dégradation des sols et l'accès limité aux terres cultivables constituent des menaces majeures pour la sécurité alimentaire et l'économie paysanne en Afrique subsaharienne. La symbiose mycorhizienne est aujourd'hui perçue comme une solution écologiquement viable à des contraintes tant biotiques qu'abiotiques à la production agricole. Il est donc opportun d'investiguer la symbiose mycorhizienne sur les bananiers afin d'élaborer des stratégies appropriées pour une meilleure contribution des Champignons Mycorhiziens à Arbuscules (CMA) à sa productivité. Une expérimentation couplée à un inventaire des CMA a été réalisée au Nord-Kivu dans un gradient d'associations culturales à base des bananiers. Des échantillons de sol et des racines ont été collectés et analysés en vue de l'appréciation des paramètres relatifs aux CMA. Cinq espèces de CMA ont été recensées sur les bananiers et leurs cultures associées : *Glomus glomus*, *Rhizophagus irregulare*, *Gigaspora margarita*, *Scutellospora ovalis* et *Acaulospora scrobiculata*. Leur abondance a été influencée par les modalités d'associations culturales et a varié de 136,7 à 337,5 spores/100g de sol, avec 278,4 spores/100g de sol en culture pure des bananiers. Pour les cultures associées, la densité a varié de 360 à 555 spores / 100g de sol, respectivement sur le haricot et sur le taro. L'intensité de mycorhization des souches de bananiers a varié de 9 à 26% et celle des cultures associées de 31 à 38%. Cependant, dans les associations comportant le taro en présence du sorgho, les bananiers ont présenté des intensités de mycorhization plus élevées. Les espèces des CMA réagissent diversement aux propriétés physico-chimiques des sols. La proximité du manioc réduit la fréquence des CMA sur les bananiers tandis que celle du taro et/ou du sorgho l'augmente. Celle du haricot l'influence moins. Les cultures du taro et du sorgho en association avec les bananiers contribuent à l'augmentation de la fréquence des CMA sur ce dernier, contrairement au manioc.

Mots-clés: Biofertilisation, Bioprotection, *Gigaspora margarita*, *Glomus glomus*, *Musa* spp., *Scutellospora ovalis*.

ABSTRACT

Climate change, soil degradation and limited access to arable land represent major threats to food security and peasant economy in sub-Saharan Africa. Mycorrhizal symbiosis is now viewed as an environmentally viable option to both biotic and abiotic agricultural production' constraint. It is therefore worth investigating the mycorrhizal symbiosis on banana to develop appropriate strategies for a better contribution of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) to its productivity. This study, through a faunal analysis, aimed to investigate the link between crop associations and mycorrhizal symbiosis on banana trees in North Kivu. A field experiment combined with an inventory of AMF was carried out in Nord-Kivu on a gradient of banana-based crop associations. Soil and roots samples were collected and analyzed to determine parameters related to AMF. Five species of AMF were identified on banana and their associated crops: *Glomus glomus*, *Rhizophagus irregulare*, *Gigaspora margarita*, *Scutellospora ovalis* and *Acaulospora scrobiculata*. Their abundance was influenced by cropping systems and varied from 136.7 to 337.5 spores/100 g soil,

with 278.4 spores/100 g soil in pure banana cultivation. For associated crops, the density varied from 360 to 555 spores/100 g soil, on bean and taro respectively. The mycorrhization intensity of banana strains varied from 9% to 26% and that of associated crops from 31% to 38%. However, banana plants showed the highest mycorrhization intensities in the associations including taro in the presence of sorghum. CMA species react differently to the soil physicochemical properties. The proximity to cassava reduces the frequency of AMF on banana while that of taro and/or sorghum increases it, and the proximity of bean influences it less. Taro and sorghum in association with banana contribute to the increase of AMF frequency on banana, contrarily to cassava.

Keywords: Biofertilization, Bioprotection, *Gigaspora margarita*, *Glomus glomus*, *Musa* spp., *Scutellospora ovalis*.

1. INTRODUCTION

Dans nombreux pays de l'Afrique subsaharienne, la sécurité alimentaire et l'économie paysanne sont actuellement menacées par les changements climatiques couplés à la dégradation des sols et à la disponibilité limitée des terres agricoles (HLPE, 2012 ; Dupaigne, 2015). Le Nord-Kivu (RDC) est l'une des régions qui vit cette réalité. Il connaît une forte concentration humaine sur une bande d'environ 60 km de largeur autour de l'axe routier Goma-Butembo-Beni où des villages ont formé par endroit de grandes agglomérations de plus de 100 mille habitants, en plus de trois villes de 600 mille à 1,8 millions d'habitants. Dans cette bande, les espaces sont suffisamment exploités (Vikanza, 2011). La superficie moyenne des exploitations agricoles est inférieure au demi hectare pour un ménage de 6 à 8 personnes. Ainsi, la faible disponibilité des terres agricoles due au surpeuplement demeure une contrainte majeure à l'agriculture au Nord-Kivu (MinPro de Plan, 2017), auxquelles s'ajoute la récurrence des maladies et des ravageurs de cultures.

Les bananiers figurent parmi les cultures de grande importance socio-économique au Nord-Kivu. Occupant la deuxième position dans la production nationale après le manioc, la banane constitue une importante source de revenus et d'emplois paysans (INS, 2022). Cependant, la productivité des bananiers est compromise par la baisse de fertilité des sols, la récurrence tant des épisodes de déficit hydrique que des attaques parasitaires (Delstanche, 2011). Dans le contexte de la faible disponibilité de terres au Nord-Kivu, les bananiers sont souvent exploités au sein des associations culturales, allant du simple au plus complexes. Par rapport à la monoculture pérenne, les associations culturales offrent l'avantage de diversifier les récoltes pour assurer la sécurité alimentaire et minimiser le risque de mauvaises récoltes, en plus d'optimiser l'utilisation de la main d'œuvre et accroître les revenus (Delstanche, 2011). Par ailleurs, les associations culturales permettent de réduire la pression parasitaire sur les cultures et de promouvoir l'établissement de relations symbiotiques (Gurr *et al.*, 2017). L'optimisation de ces interactions a permis d'obtenir de nettes augmentations des productions agricoles tant en quantité qu'en qualité (Malézieux, 2012). Par des inoculations artificielles, l'exploitation de la symbiose mycorrhizienne est aujourd'hui perçue comme une alternative à des contraintes tant biotiques qu'abiotiques (Deogratias *et al.*, 2015 ; Deogratias & Cannesan, 2018). Les CMA permettent un bon développement des plantes hôtes dans diverses conditions de stress (Begun *et al.*, 2019) et interviennent dans la formation, la stabilisation et le développement d'agrégats de la matière organique du sol (Brito *et al.*, 2012 ; Wu *et al.*, 2023). Ainsi, la symbiose mycorrhizienne procure aux cultures hôtes une meilleure alimentation tant hydrique que minérale, surtout en phosphore et en azote (Begun *et al.*, 2019). Plusieurs auteurs ont également documenté le rôle des CMA dans l'induction de la résistance des plantes hôtes aux bioagresseurs (Debashis & Somdatta, 2022 ; Dey & Ghosh, 2022). Les CMA établissent aussi des interactions positives avec d'autres microorganismes bénéfiques de la rhizosphère pour améliorer la santé et le développement des plantes (Filion *et al.*, 1999 ; Nasslahsen *et al.*, 2022, Hnini *et al.*, 2024). L'exploitation des CMA constitue alors une opportunité pour optimiser le système de production agricole dans les zones confrontées à des contraintes de faible fertilité des sols, à des aléas climatiques et à la pression des phytoparasites, notamment des phytonématodes.

Le Nord-Kivu est l'une des régions d'Afrique tropicale fortement confrontées à ces contraintes agricoles. Cependant, aucune étude n'a été conduite à ce jour sur l'occurrence et la diversité des CMA dans les systèmes de production, et des bananes particulièrement. Dès lors, la présente étude qui est la première, a consisté à faire l'état des lieux de la symbiose mycorrhizienne des bananiers au sein d'un gradient d'associations culturales. De façon spécifique, elle vise à identifier les espèces de CMA et à déterminer leurs réponses vis-à-vis des modalités d'associations culturales et des propriétés physico-chimiques des sols. Ces objectifs permettraient de répondre aux questions suivantes: les modalités d'associations culturales influent-elles sur l'abondance et la diversité des CMA associés aux bananiers? Les propriétés physico-chimiques des sols affectent-elles l'abondance et la diversité des CMA?

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Milieu d'étude

Le Nord-Kivu, où s'était déroulée l'étude, est une province de l'Est de la RDC située 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 (Figure 1). Etalé sur une superficie de 59631 km², il compte plus de 9 millions d'habitants, avec une densité de plus de 100 habitants par Km² (Makiso *et al.*, 2025).



Figure 1: Concentration des villages et cités le long de l'axe routier RN4 au Nord-Kivu

L'hétérogénéité du relief permet de définir trois zones agroécologiques au Nord-Kivu: 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. La pluviométrie moyenne varie entre 1000 mm et 2000 mm. Les précipitations mensuelles les plus faibles sont enregistrées entre Janvier et Février mais également entre Juillet et Août. Bien qu'actuellement sujette à des changements climatiques, le Nord-Kivu reçoit des pluies étalées sur toute l'année (MinPro de Plan, 2017). Par ailleurs, 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 (MinPro de Plan, 2017).

2.2. Matériel

Deux catégories de matériel ont été utilisées au cours de la présente étude. Le matériel végétal utilisé était composé, d'une part, par de souches de bananiers (*Musa* spp.) et des cultures associées. Les cultures associées comprenaient le manioc (*Manihot esculenta*, Euphorbiaceae), le haricot (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae), le sorgho (*Sorghum bicolor*, Poaceae) et le taro (*Colocasia esculenta*, Araceae). Elles ont été choisies en tenant compte de la pratique observée dans le système de production de bananes dans la zone d'étude. D'autre part, les microorganismes étudiés étaient des souches locales de CMA extraits de la rhizosphère des cultures.

2.3. Méthodes

2.3.1. Conduite de l'essai

L'essai a été conduit dans la zone de moyenne altitude du territoire de Beni, en localité de Maboya, suivant un dispositif expérimental de trois blocs complets randomisés de 10 traitements. Ceux-ci portaient sur les modalités d'associations culturales les plus fréquentes dans les bananeraies (Tableau 1). Chaque traitement (modalité d'association culturale) a occupé une parcelle de 250 m². Pour les bananiers, des écartements de 4 m x 4 m ont été observés, totalisant ainsi 16 plants par parcelle. Quant aux cultures associées, les écartements entre les plants étaient de 30 cm x 30 cm pour le haricot, 75 cm x 75 cm pour le manioc et 1 m x 1 m pour le sorgho et le taro. Dans chaque bloc, les parcelles étaient séparées par des sentiers de 4 m de largeur tandis que les blocs l'étaient par des sentiers de 6 m.

Tableau 1: Associations culturales en expérimentation

Modalités des traitements	Sigles	Niveau d'associations culturales
Culture pure	Culture pure	Culture pure
Bananiers + Haricot	Harban	Association binaire
Bananiers + Manioc	Manban	Association binaire
Bananiers + Taro	Tarban	Association binaire
Bananiers + Manioc + Haricot	Maharban	Association ternaire
Bananiers + Taro + Haricot	Taharban	Association ternaire
Bananiers + Taro + Sorgho	Tasoban	Association ternaire
Bananiers + Manioc + Sorgho	Masoban	Association ternaire
Bananiers + Taro + Sorgho + Haricot	Tasoharban	Association quaternaire
Bananiers + Taro + Sorgho + Haricot	Masoharban	Association quaternaire

Dans chaque parcelle expérimentale, 75% des souches étaient de plantains, 18,7% étaient des bananiers à cuire et 6,3 % étaient des bananiers de dessert. Le matériel de plantation utilisé a été constitué des Plants Issus des Fragments de tige des bananiers, permettant ainsi d'utiliser des plants homogènes et exempts de parasites pour l'étude. Les explants ont été mis en place dans les parcelles issues de longues jachères qui ont subi des travaux préparatoires. Ces parcelles ont subi régulièrement les sarclages et autres travaux d'entretien dont l'effeuillage et l'ébourgeonnement de souches des bananiers. Chaque parcelle expérimentale a été soumise à l'exploitation continue des cultures associées aux bananiers lui affectée. Les échantillons tant des sols que des racines étaient prélevés entre les mois de Juillet et d'Août, avant le début de la grande saison pluvieuse, et ce, sur les plants au stade d'initiation florale. Bien que l'expérimentation ait été conduite sur une durée de quatre ans, les observations ont été effectuées au cours de trois campagnes de prélèvement annuel des données. Le présent article ne porte que les analyses des données de la troisième année de l'expérimentation.

2.3.2. Collecte des échantillons, extraction et identification des CMA

L'investigation sur la présence des CMA a été conduite sur les racines des plants des cultures et dans leurs rhizosphères respectives, à leur stade phénologique de pré-floraison. Au niveau des cultures, des racines ont été prélevées sur quatre plants des bananiers et 6 à 10 plants pour les cultures associées. A l'aide d'une tarière, les échantillons d'environ 500 g du sol ont été prélevés à une profondeur de 10 à 15 cm, à une distance de 30 cm des plants de bananiers et de 5 à 10 cm des plants de cultures associées. Ces plants ont été aléatoirement choisis pour le prélèvement des racines, en tenant compte de l'effet de bordure de la parcelle. Les échantillons de sol issus d'une même parcelle et d'une même culture ont été soigneusement mélangés et un échantillon composite a été prélevé pour les analyses. Cette même approche a été utilisée pour les échantillons des racines.

L'extraction de spores des CMA dans les échantillons de sol a été faite suivant la méthode de Walker (2013), qui consiste au tamisage humide de 100 g de sol mis en suspension dans 500 mL d'eau de robinet. La suspension obtenue a été transvasée dans deux tamis à mailles décroissantes (1mm et 50 µm). Le filtrat a été rejeté et le déchet récupéré à l'aide d'un jet d'eau stérilisée de la pissette sur le tamis en vue de recueillir le mélange sur une boîte de Pétri. Ce mélange était mis dans des tubes Falcon préalablement étiquetés. Ceux-ci ont été soumis à la première centrifugation pendant 5 min à 2000 trs/min. Le surnageant a été rejeté et ces tubes ont été remplis de la solution de sucre à 30% de concentration puis soumis à la seconde centrifugation de 2 min à 2000 trs/min. Le surnageant a été filtré dans un tamis de 45 µm et les déchets ont été récupérés dans une boîte de

Pétri à l'aide d'un jet d'eau stérilisé de la pissette dans le tube Falcon. La solution (eau de la pissette et déchets récupérés dans le tube Falcon) a été conservée dans des flacons préalablement étiquetés. Cette solution a été soumise à la visualisation au microscope Olympus BX51, en vue du dénombrement des spores des CMA et de l'identification provisoire sur base de la forme et de la couleur de spores décrites et illustrées par Husna *et al.* (2017).

Des dizaines de spécimens de chaque forme des CMA ont été piqués avec une micropipette dans la suspension, conservées dans des tubes à Eppendorf contenant du glycérol puis expédiées au laboratoire MacroGen Europe à Amsterdam Pays Bas pour l'identification au niveau de l'espèce à l'aide des analyses biomoléculaires. La méthode de séquençage Illumina a été mise en contribution. Celle-ci a utilisé l'ARN comme matériel de départ. Ainsi, l'extraction des ARN totaux a été suivie de leur rétro-transcription en ADN complémentaire (ADNc) et ensuite de la préparation des bibliothèques. Ces dernières ont été préparées en fragmentant l'ADN/ADNc de départ et en ajoutant à chaque fragment des adaptateurs synthétiques faits d'ADN. Les bibliothèques ont été préamplifiées avant le séquençage. Le séquençage Illumina a permis d'obtenir des dizaines de millions de séquences, appelées "reads", qui ont été "converties" en ADNc double brin. Les fragments ont été ligaturés de part et d'autre par des adaptateurs de séquençage qui ont permis à l'automate de reconnaître les fragments et de séquencer plusieurs échantillons en même temps. Les ADNc ont été ensuite amplifiés en utilisant l'amorce ITS1 (TCC GTA GGT GAA CCT GCG GCC) et ITS4 (TCC TCC GCT TAT TGA TAT GCA) (Illumina Inc., 2021). Ce qui a permis d'obtenir les données RNA-Seq nécessaires à la comparaison de niveaux d'expression génique (Chen *et al.*, 2011). Ces données ont été alignées en paire sur base d'un génome de référence (McGettigan, 2013). L'outil DADA2 a été utilisé pour effectuer une inférence rapide et précise à partir de données RNA-Seq avec une résolution d'association nucléotidique. Celle-ci a permis de déduire avec exactitude des variantes de séquence d'amplicons (ASV). Celles-ci ont été enregistrées dans le dossier dada2/ASV_seqs.fasta, et leur quantification dans dada2/ASV_table.tsv. La classification taxonomique a été réalisée par DADA2 et à partir de la base de données des ASV et ont été chargées dans QIIME2 (Bolyen *et al.*, 2019). Au sein de QIIME2, les données finales ont été visualisées dans un *barplot*, qui est un graphique interactif facilitant la navigation exploratoire des taxons découverts et leur abondance dans les échantillons. Le dossier qiime2/barplot contenant des *barplots* a été ouvert dans navigateur Web, en cliquant sur qiime2/barplot/index.html. Les séquences d'ARN ont été déterminées par la production des fichiers RDS directement chargeable dans R et phyloseq (Illumina Inc., 2021).

2.3.3. Analyse physico-chimique des échantillons de sol

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).

2.3.4. Détermination de la diversité et de l'abondance des CMA

Les données ont permis de déterminer quelques indices écologiques des CMA : 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 observées dans l'ensemble des relevés. La densité qui correspond au nombre d'individus 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 $A = \frac{n_i}{N} * 100$, où n_i est le nombre d'individus d'une espèce et N = nombre total des individus. En vue de renseigner sur la variation de la structure des peuplements des CMA, l'indice de Shannon a été calculée pour chaque agrosystème par $H = - \sum_{i=1}^S \frac{N_i}{N_s} \ln \frac{N_i}{N_s}$ où S est le nombre total d'espèces présentes, N_i est l'effectif de l'espèce i dans l'échantillon et N_s est l'effectif total (Magurran, 2003). Le degré d'uniformité qui traduit le niveau de ressemblance des individus au sein d'un écosystème a été déterminé par Degré d'uniformité = $\frac{\sum n(n-1)}{N(N-1)}$ où N = le nombre d'individus dans la communauté et n = le nombre d'individus de chaque taxon (Marcon, 2014). En fin, la Fréquence d'occurrence (ou Fréquence d'apparition) qui est le rapport exprimé entre le nombre de relevés (P_i) contenant l'espèce (i) et le nombre total de relevés (P) contenant l'espèce (i), a été calculé par la formule $FO = \frac{P_i}{P} * 100$. En fonction de la valeur

de FO, on distingue les espèces omniprésentes si FO = 100%; les espèces constantes si 75% ≤ FO < 100%; les espèces régulières si 50% ≤ FO < 75%; les espèces accessoires si 25% ≤ FO < 50% et les espèces accidentelles si 5% ≤ FO < 25% (Marcon, 2014).

2.3.5. Estimation de la fréquence et de l'intensité de mycorhization des racines

Sur chaque plante échantillonnée, dix morceaux de racines de 2 cm de longueur ont été prélevés et utilisés pour évaluer la fréquence et l'intensité de la mycorhization des racines. Les racines ont été plongés dans des tubes Eppendorf contenant une solution de KOH à 10 % et ont été soumis à un chauffage au bain-marie à 90 °C durant 30 min. Ensuite, les racines rincées avec l'eau distillée, ont été replongées dans la solution HCl à 1% et colorées avec du bleu Trypan à 0,05 %. En fin, les fragments de racines colorés ont été conservés dans de flacons contenant un volume quelconque de glycérol acidifié (Trouvelot *et al.*, 1986). Sur les dix morceaux de racines, le nombre de sections colonisées par des hyphes, des arbuscules ou des vésicules a été compté et le pourcentage exprimé en fréquence de colonisation par les CMA (Affokpon *et al.*, 2011). L'intensité de mycorhization a été évaluée au microscope binoculaire Olympus BX51 selon la méthode de Trouvelot *et al.*, (1986) suivant l'échelle de notation de 0 à 5 avec 0 : Absence de colonisation et 5 : Plus de 90% de la surface colonisée (Figure 2).

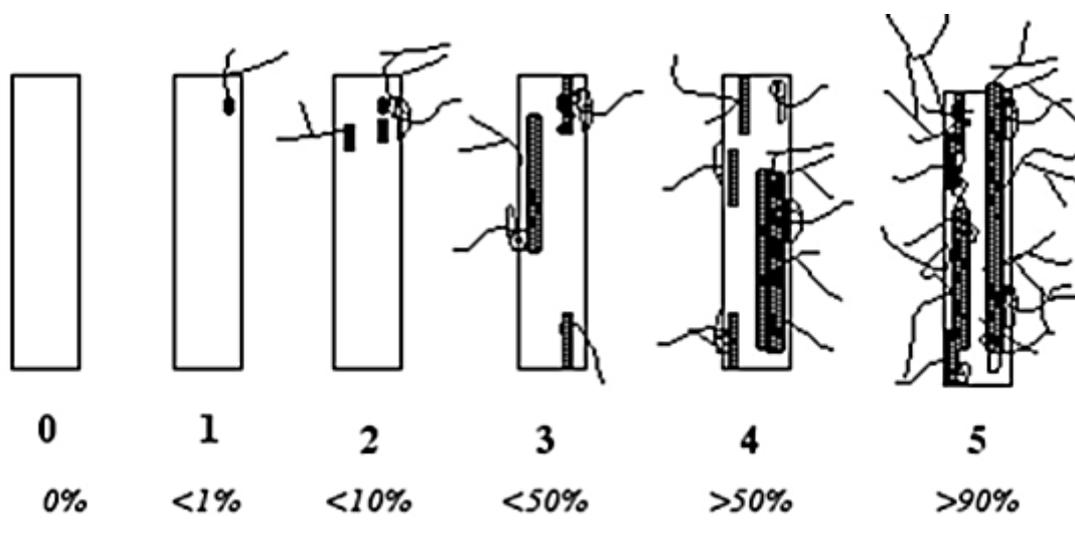


Figure 2: Echelle d'évaluation de la mycorhization des racines. (Trouvelot *et al.*, 1986)

L'intensité globale de la mycorhization d'un plant (et même d'une parcelle) a été déterminée selon la formule de Hamid et Collion (2004) :

$$IGM(\%) = \frac{(95n_5 + 70n_4 + 30n_3 + 5n_2 + n_1)}{\text{Nombre total de fragments}}$$

Où n_5 représente le nombre de fragments mycorhizés notés 5, n_4 le nombre des fragments notés 4, n_3 le nombre des fragments notés 3, etc.

2.3.6. Analyses statistiques des données

Les données issues de l'évaluation de la densité de spores ont été soumises à des analyses de variances à un facteur à l'aide du logiciel PAST version 2.15. Ces analyses ont permis de faire ressortir l'existence ou non de différence significative entre les modalités et les niveaux d'associations culturales mais également entre les espèces des CMA. Par ailleurs, les moyennes ont été comparées avec le test HSD Turkey au seuil de signification de 5% en vue de la séparation des moyennes. Les colonnes suivies de barre représentent des moyennes de trois blocs et leur écart-type, avec de lettres alphabétiques identiques ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$) selon le test HSD Turkey. Les interactions entre les CMA 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. RESULTATS

3.1. Espèces de CMA identifiées dans la rhizosphère des plants des bananiers et leurs densités

Cinq espèces de CMA ont été identifiées dans la rhizosphère des plants des bananiers. Ces espèces, toutes de la Classe des Gloméromycètes, appartiennent à trois familles regroupées dans trois ordres. Il s'agit de *Glomus glomus* et *Rhizophagus irregulare* (Glomeraceae - Glomérales), *Gigaspora margarita* et *Scutellospora ovalis* (Gigasporaceae - Gigasporales) et *Acaulospora scrobiculata* (Acaulosporaceae - Diversisporales).

Les densités des CMA ont significativement varié entre les espèces ($p = 0,047$) avec une moyenne générale de $322,2 \pm 24,3$ spores/100g de sol. L'espèce *G. margarita* a la densité la plus élevée avec $105,5 \pm 23,1$ spores/100 g de sol et la densité la plus faible ($42,5 \pm 29,3$ spores/100 g sol) a été pour *A. scrobiculata* (Figure 3).

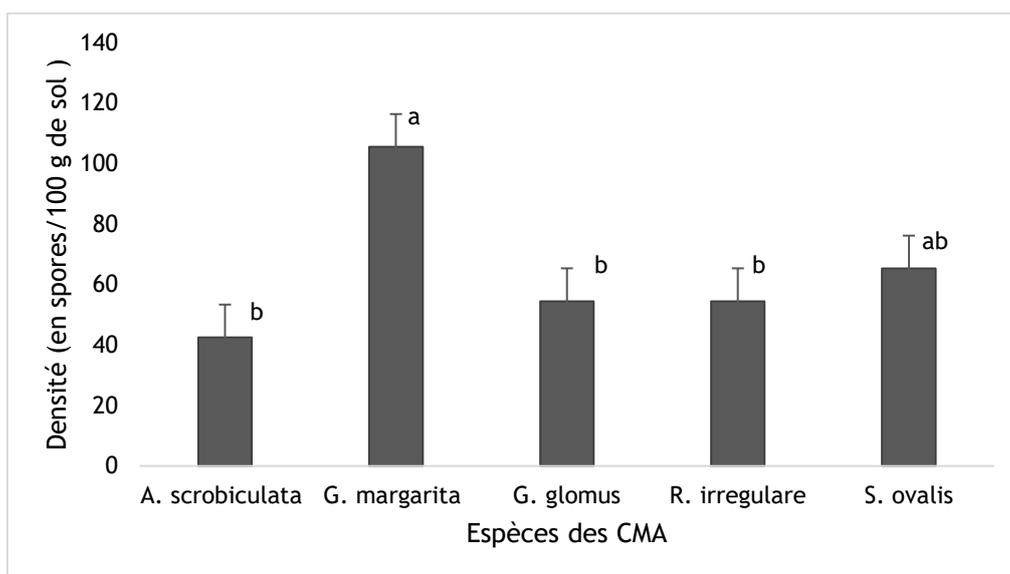
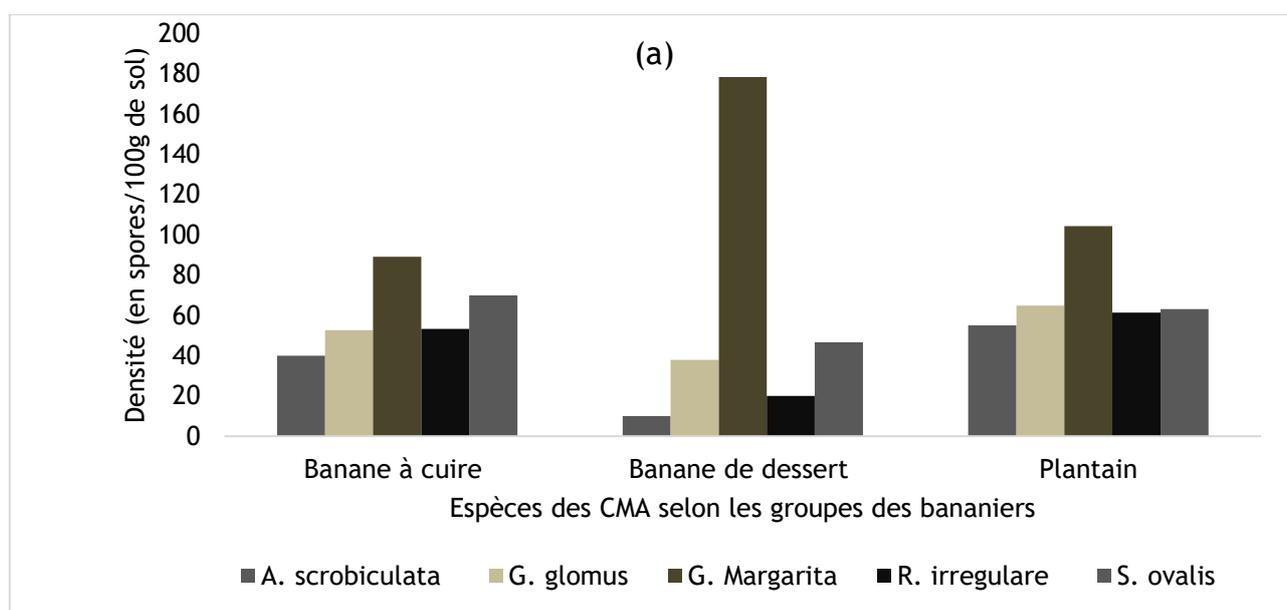


Figure 3 : Densité des espèces des CMA dans la rhizosphère des bananiers

L'identification des espèces de CMA et l'estimation de leurs densités de spores en fonction des groupes de bananiers (plantains, bananiers à cuire et bananiers de dessert) ont montré que les trois groupes ont été colonisés par les mêmes espèces des CMA avec des densités de spores variant de $293 \pm 19,5$ à $348,6 \pm 19,7$ spores/100 g de sol (Figure 4a-b) et que ces variations de densités observées entre les groupes de bananiers ne sont pas significatives ($p = 0,911$).



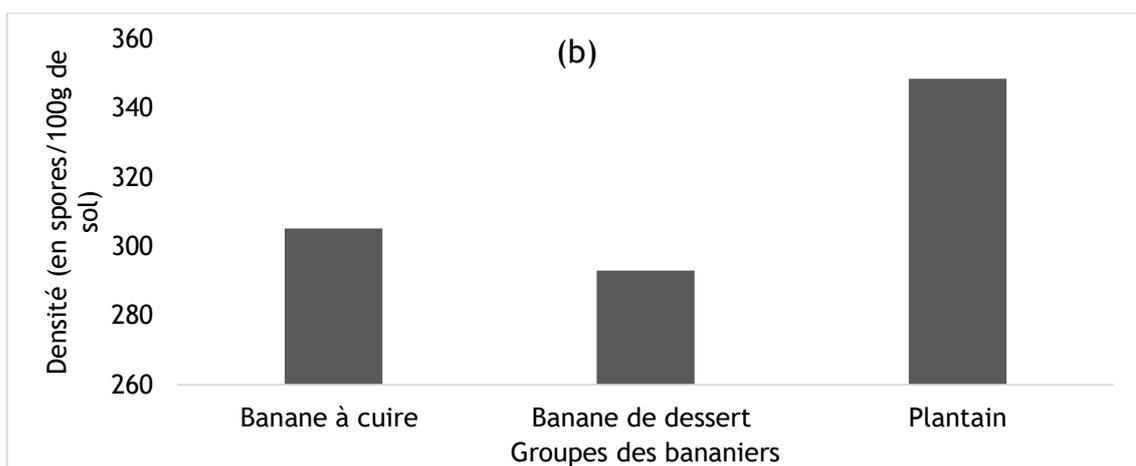
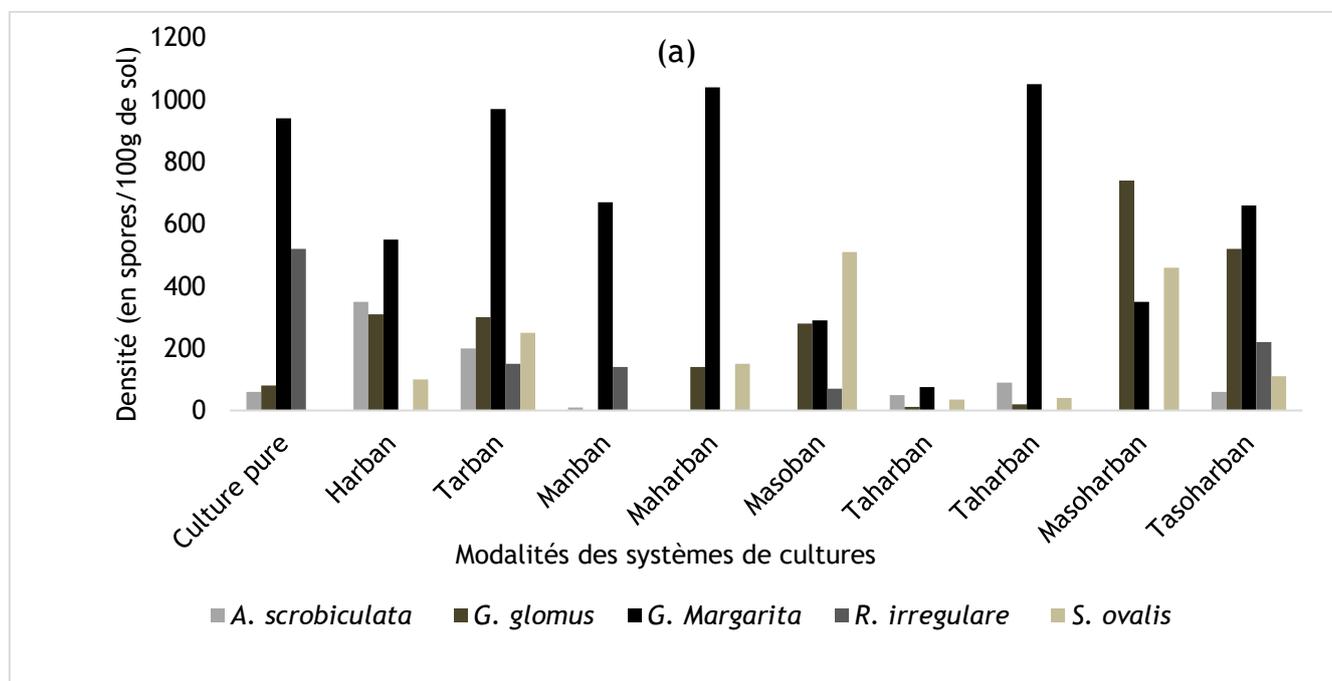


Figure 4: Densités de spores des CMA (a) et par groupe de bananiers (b)

3.2. Espèces et densités de CMA identifiées dans la rhizosphère des plants de bananiers dans les associations culturales

Les densités moyennes des espèces des CMA sur les plants des bananiers ont varié de $136,7 \pm 26,3$ à $337,5 \pm 43,1$ spores/100 g de sol, en fonction des modalités d'associations culturales (Figure 5a). Cependant, elle a été de $278.4 \pm 40,2$ spores/100 g de sol en culture pure des bananiers. Ainsi, les densités de spores obtenues dans la rhizosphère des bananiers en associations culturales ont été significativement plus élevées ($p = 0,046$) dans les associations Bananiers + Manioc (Manban) et Bananiers + Taro + Sorgho (Tasoban). Quant aux modalités d'associations culturales, des différences significatives ont été observées seulement entre l'association Bananiers + Taro + Sorgho + Haricot (Tasoharban) et les associations « Manban », « Masoban » et « Tasoban » (Figure 5b).



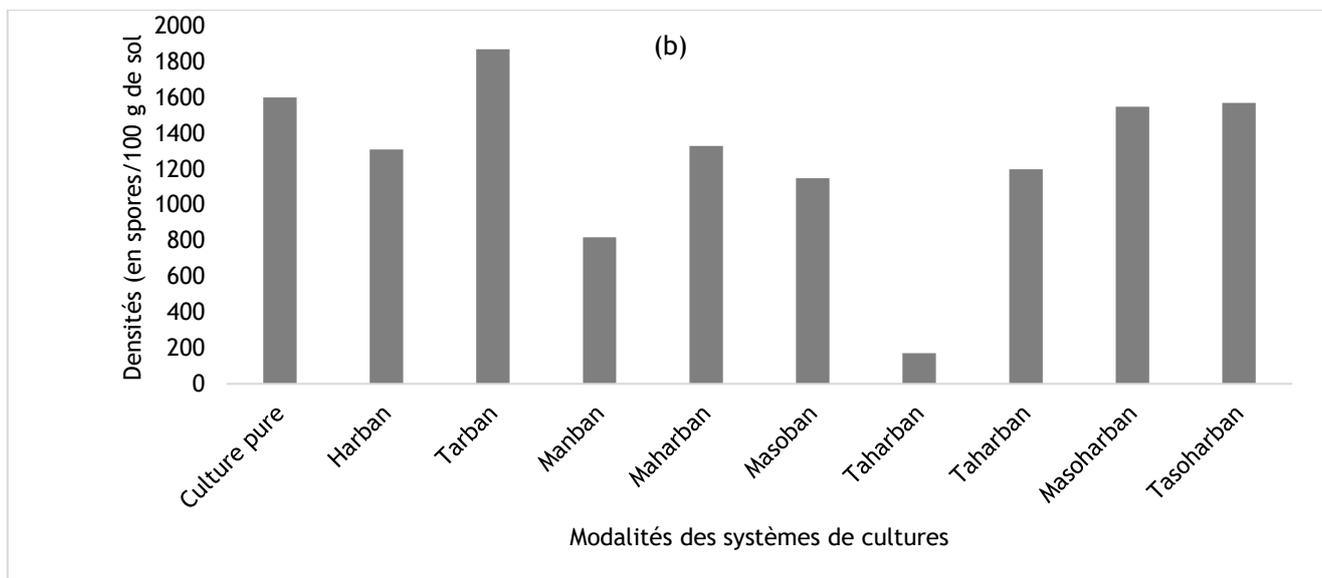


Figure 5 : Densité des espèces des CMA (a) sur les bananiers selon les modalités d’associations culturales (b)

3.3. Espèces de CMA identifiées dans la rhizosphère des cultures associées et leurs densités

Six espèces de CMA ont été isolées dans la rhizosphère des cultures associées parmi lesquelles cinq espèces identifiées sur les bananiers, auxquelles s’ajoute *Paraglomus occultum*, de la Famille de Paraglomeraceae, de l’Ordre des Paraglomerales et de la Classe de Paraglomeromycètes. Les densités de spores des espèces des CMA ont varié de $33,8 \pm 9,5$ à $111,3 \pm 61,2$ spores/100 g de sol avec des différences significatives ($p = 0,010$). L’espèce *G. glomus* a présenté la plus forte densité de spores, suivi de *R. irregulare* avec des moyennes respectives de $105 \pm 121,5$ et $82,5 \pm 97,4$ spores/100 g de sol. L’espèce *A. scrobiculata* a enregistré la plus faible densité de spores avec $77,5 \pm 59,1$ spores/100 g de sol (Figure 6).

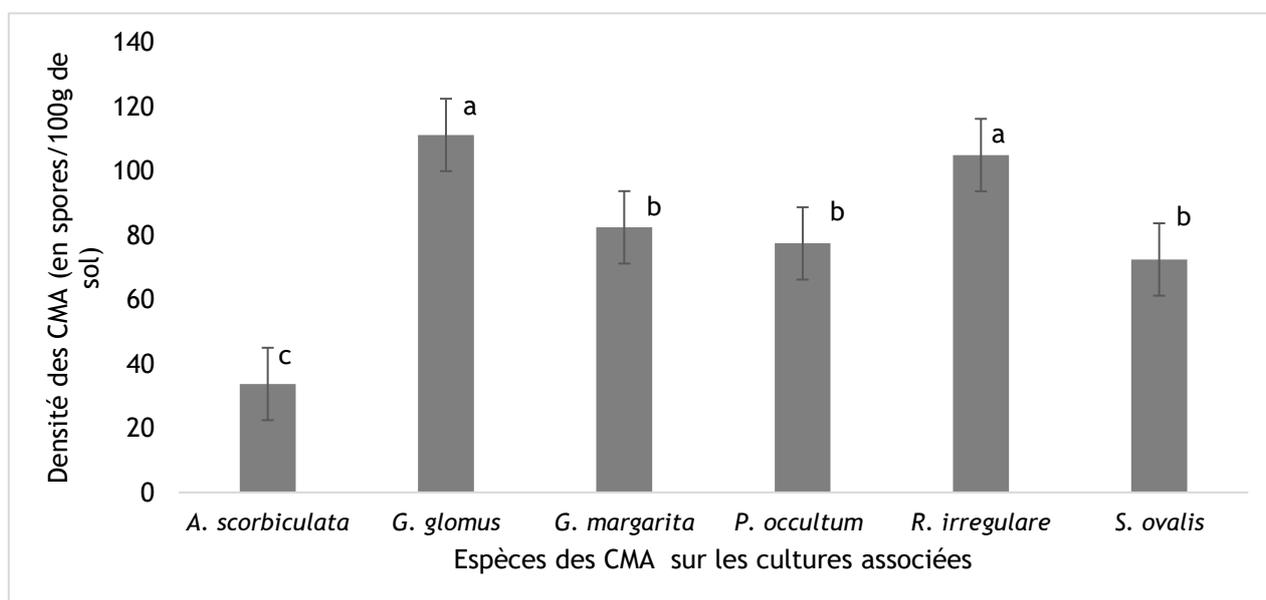


Figure 6: Densité des CMA dans la rhizosphère des cultures associées

En fonction des plantes hôtes, la densité globale de spores a varié de $360 \pm 67,8$ à $555 \pm 92,2$ spores / 100g de sol, avec une richesse taxonomique de 4 à 5 espèces (Figure 7a-b). Toutefois, les différences des densités de spores n’ont pas été significatives ($p= 0,805$) entre cultures hôtes.

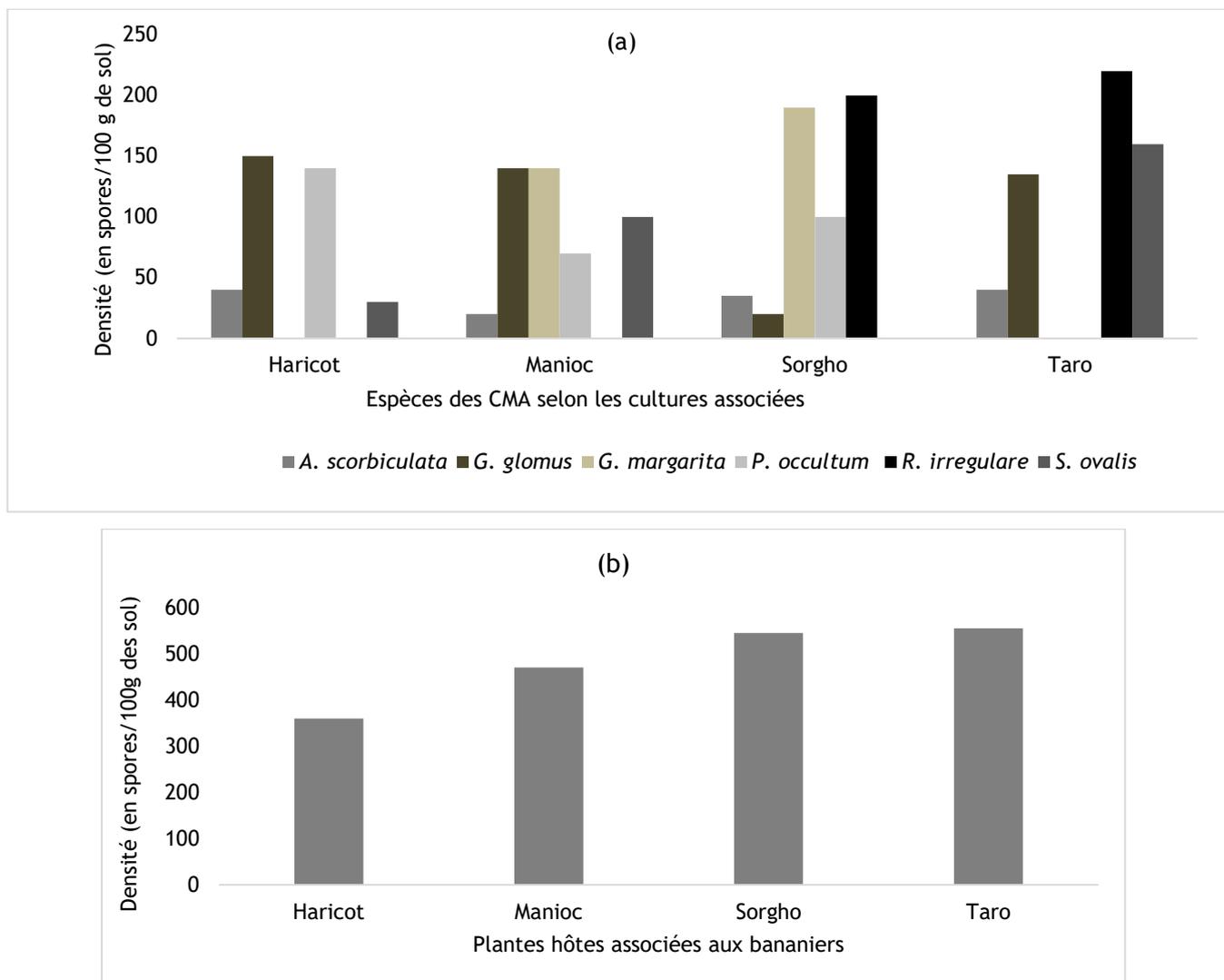


Figure 7: Densité de spores (a) par espèce de CMA et par culture associée et (b) par culture associée pour toutes espèces de CMA

3.4. Abondance et diversité des CMA dans la rhizosphère des plants des bananiers

L'abondance des CMA dans la rhizosphère de plants des bananiers a varié significativement ($p = 0,007$) en fonction des espèces (Figure 8). L'espèce *G. margarita* s'est révélée la plus dominante avec $52,4 \pm 7,9\%$ et *A. scrobiculata* la moins dominante avec $6,6 \pm 2,4\%$.

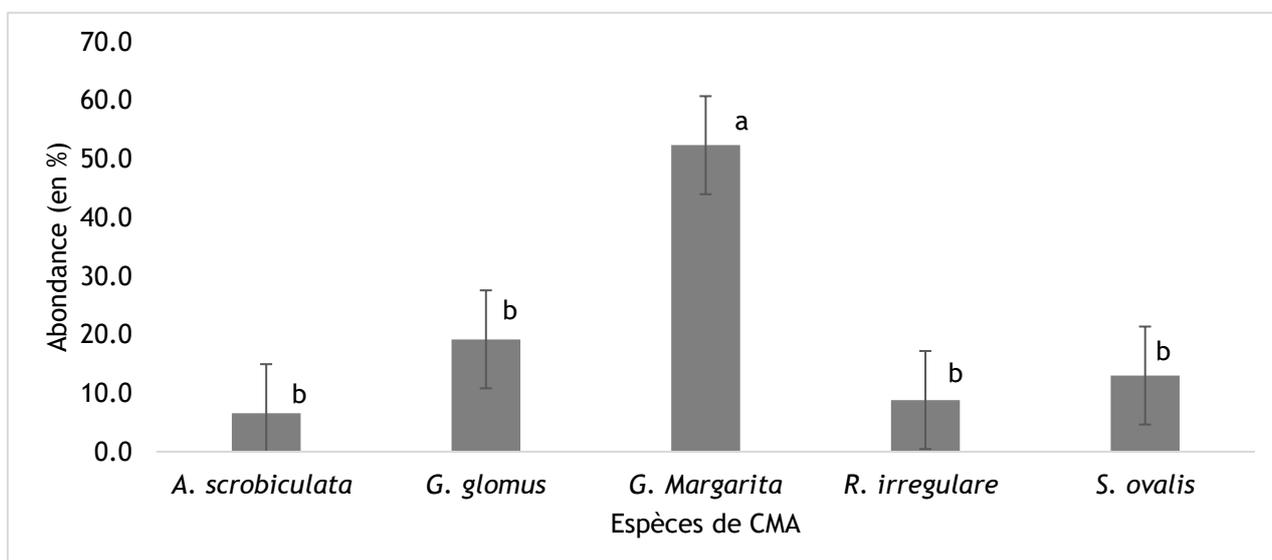


Figure 8: Abondance des espèces de CMA dans la rhizosphère des bananiers

L'abondance des espèces de CMA a varié significativement ($p = 0,026$) en fonction des groupes de bananiers (Figure 9a-b). Les plantains ont le taux d'abondance le plus élevé avec $71,4 \pm 12\%$.

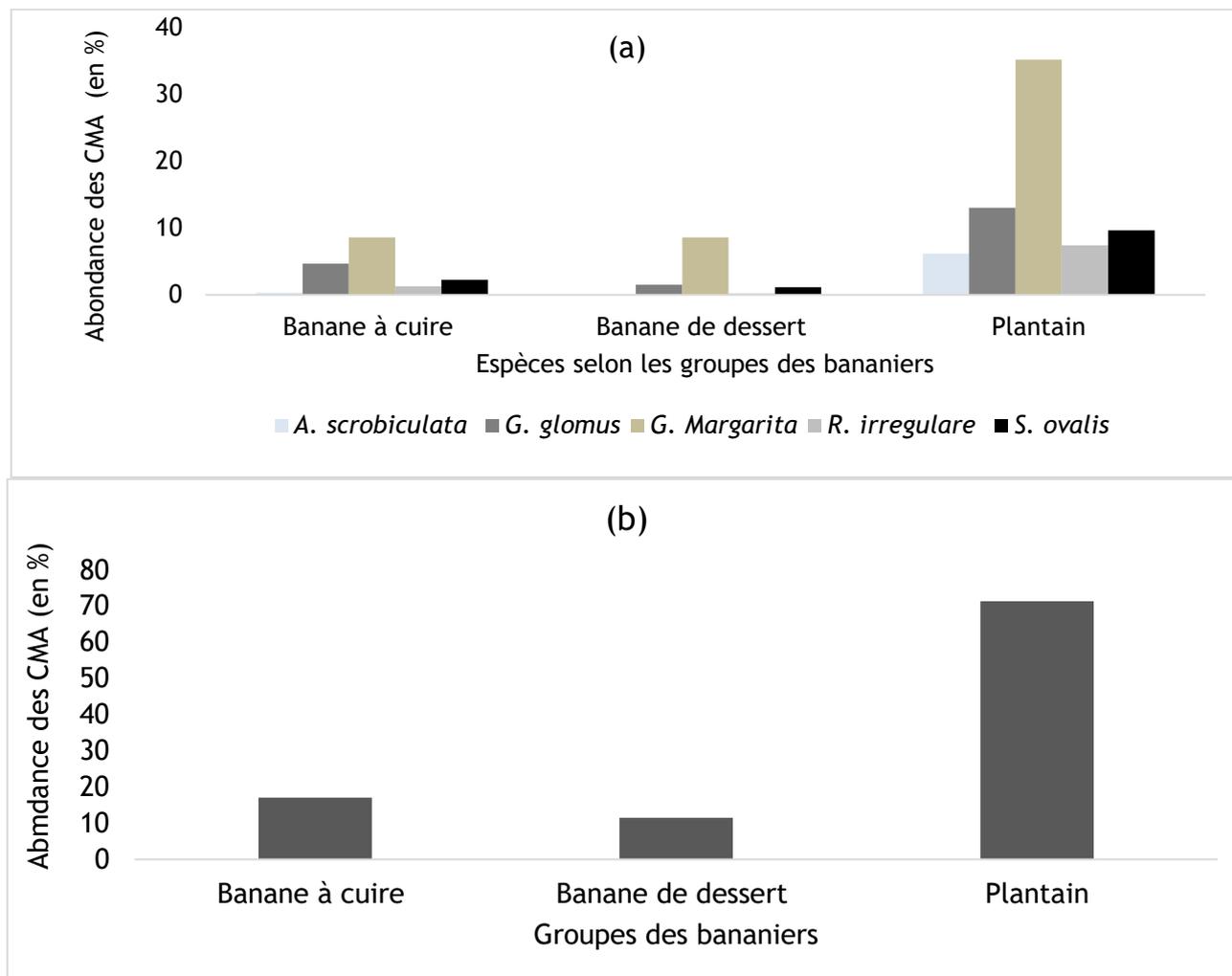


Figure 9 : Abondance des CMA sur les bananiers (a) selon les groupes (b)

Par rapport aux modalités d'associations culturales, les abondances spécifiques des CMA ont significativement varié ($p < 0,001$) avec des augmentations des *G. margarita*, *G. glomus* et *S. ovalis* dans toutes les modalités des systèmes de cultures (Figure 62a). Cependant, l'abondance globale des CMA dans la rhizosphère des plants des bananiers n'a pas significativement varié ($p = 0,384$) (Figure 62b).

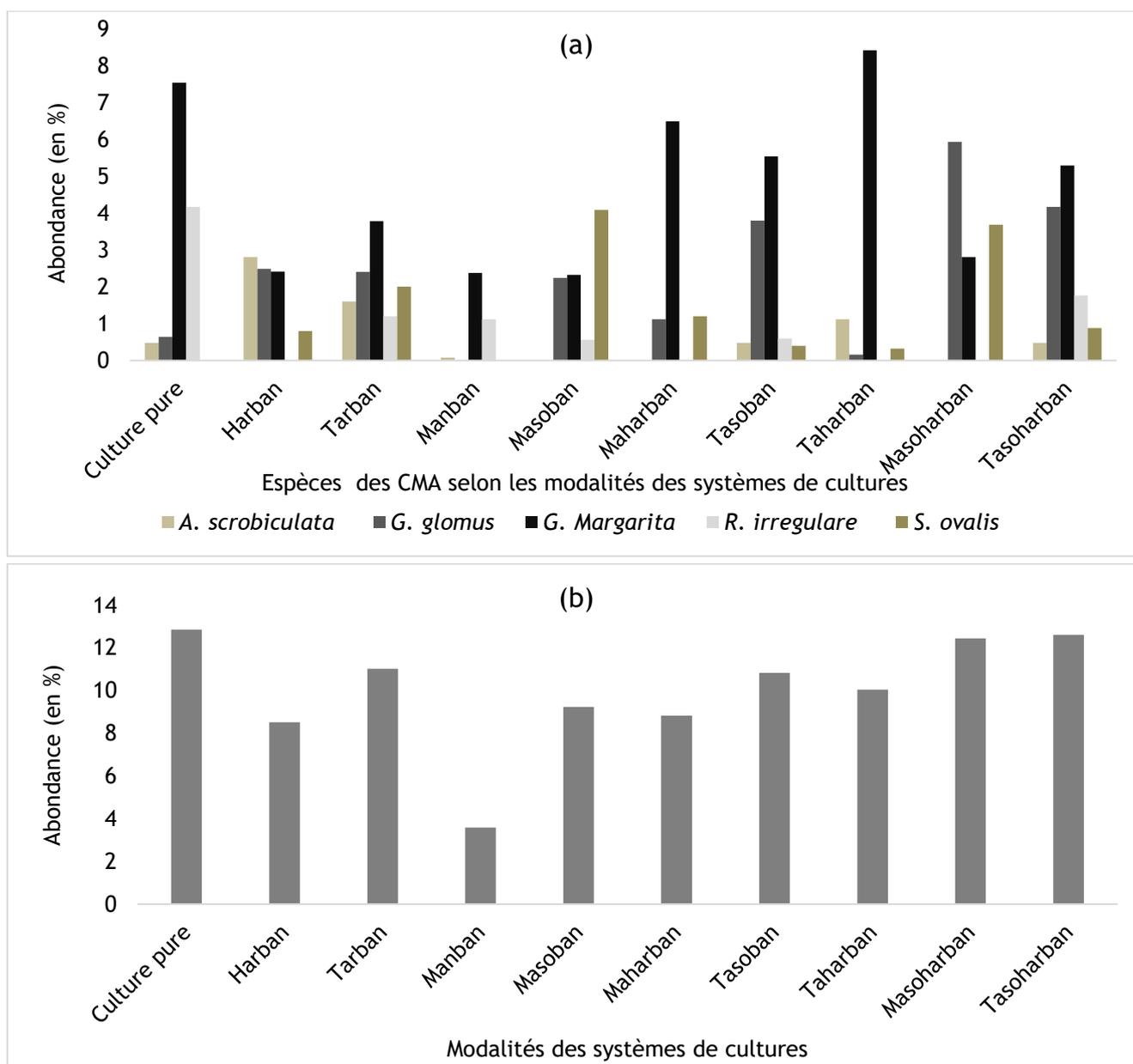


Figure 10: Abondance spécifique (a), Fréquence d'occurrence des espèces (b) et abondance globale (c) des CMA sur les bananiers selon les modalités d'associations culturales

Par contre, la diversité des CMA dans la rhizosphère des plants des bananiers a été nettement influencée par les modalités des systèmes de cultures dont les indices de Shannon ont varié de 0,95 à 1,35 (Figure 11a) avec des richesses spécifiques et des indices d'uniformité variant respectivement de 3 à 5 (Figure 11b) et 52,9 à 76,6% (Figure 11c). L'espèce *G. margarita* a été omniprésentes dans la rhizosphère des plants des bananiers de toutes les modalités des systèmes de cultures y compris la culture pure des bananiers (avec 100% de fréquences d'occurrence). Par contre, les espèces *G. glomus*, et *S. ovalis* ont été constante (avec des fréquences d'occurrence respectives de 90 et 80 %) et ont manqué dans le système binaire Bananiers + Manioc. Quant aux espèces *R. irregulare* et *A. scrobiculata*, ont été régulières dans les modalités des systèmes de cultures abrite (avec des fréquences d'occurrence respectives des 60 et 70 %) et ont été absentes essentiellement dans les systèmes comportant le manioc (Figure 11d). La diversité des CMA dans la rhizosphère des plants des bananiers a été plus élevée dans les systèmes de cultures comprenant le taro, en présence ou non du haricot et/ou du sorgho (76,6% d'uniformité) et faible dans les systèmes comportant le manioc, en présence ou non du haricot et/ou du sorgho (52,9% d'uniformité). Ainsi, par rapport à la culture pure des bananiers, les systèmes comportant le taro augmente le diversité des CMA.

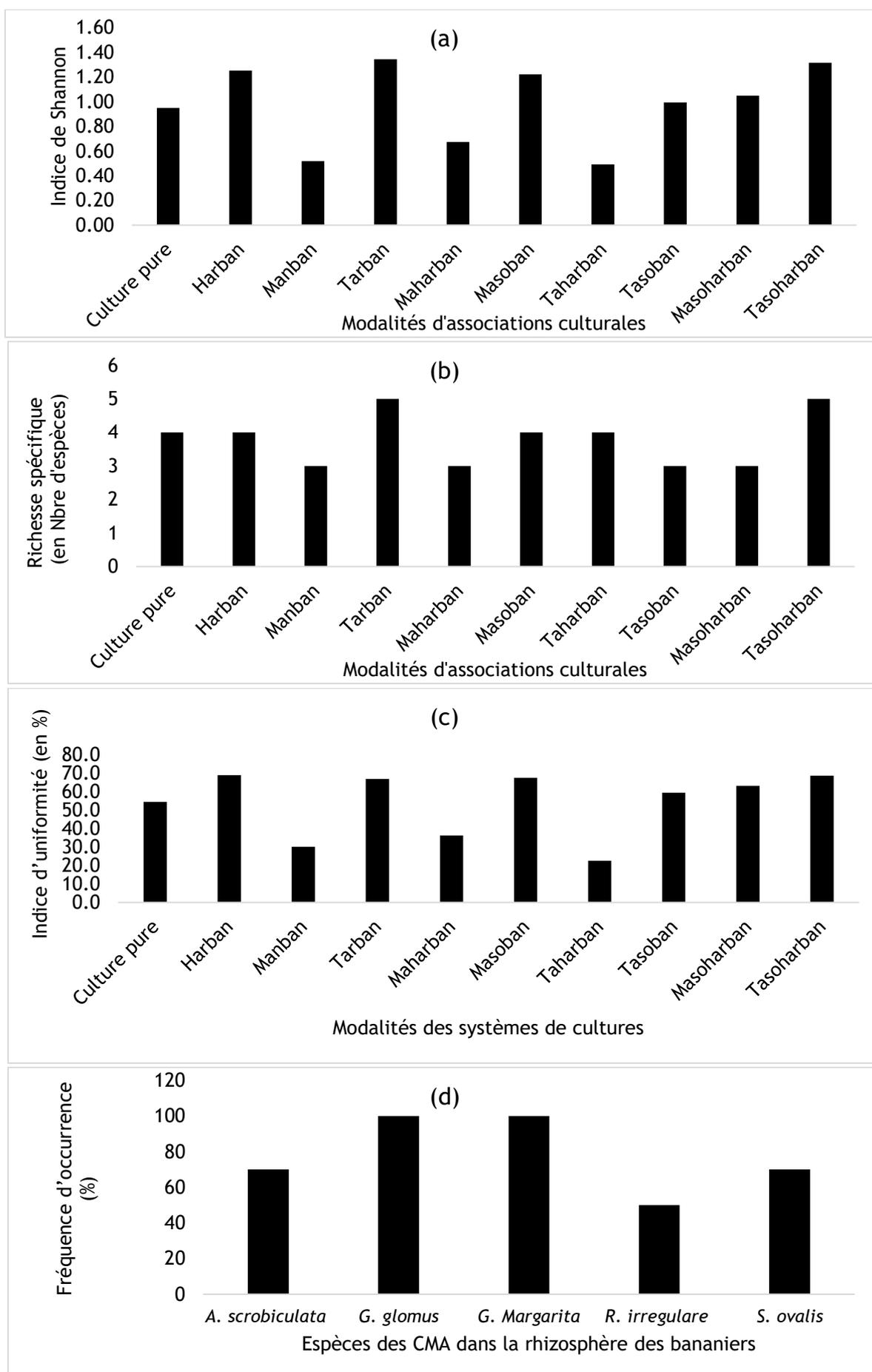


Figure 11: Diversité des CMA sur les bananiers selon les modalités d'associations culturales : Indice de Shannon (a), Richesse spécifique (b) et indice d'uniformité (c) et Fréquences d'occurrence (d)

3.5. Abondance des CMA dans la rhizosphère des cultures associées

L'abondance des CMA au niveau des cultures associées a varié de $6,5 \pm 0,6$ à $32,1 \pm 6$ % en fonction des espèces et de $21,7 \pm 4$ à $32,7 \pm 5,5$ % en fonction de cultures associées. Les différences ne sont pas significatives entre les espèces de CMA pour une même culture associée ($p= 0,541$) (Figure 12a) et l'abondance de toutes les espèces de CMA confondues entre les cultures associées ($p= 0,895$) (Figure 12b).

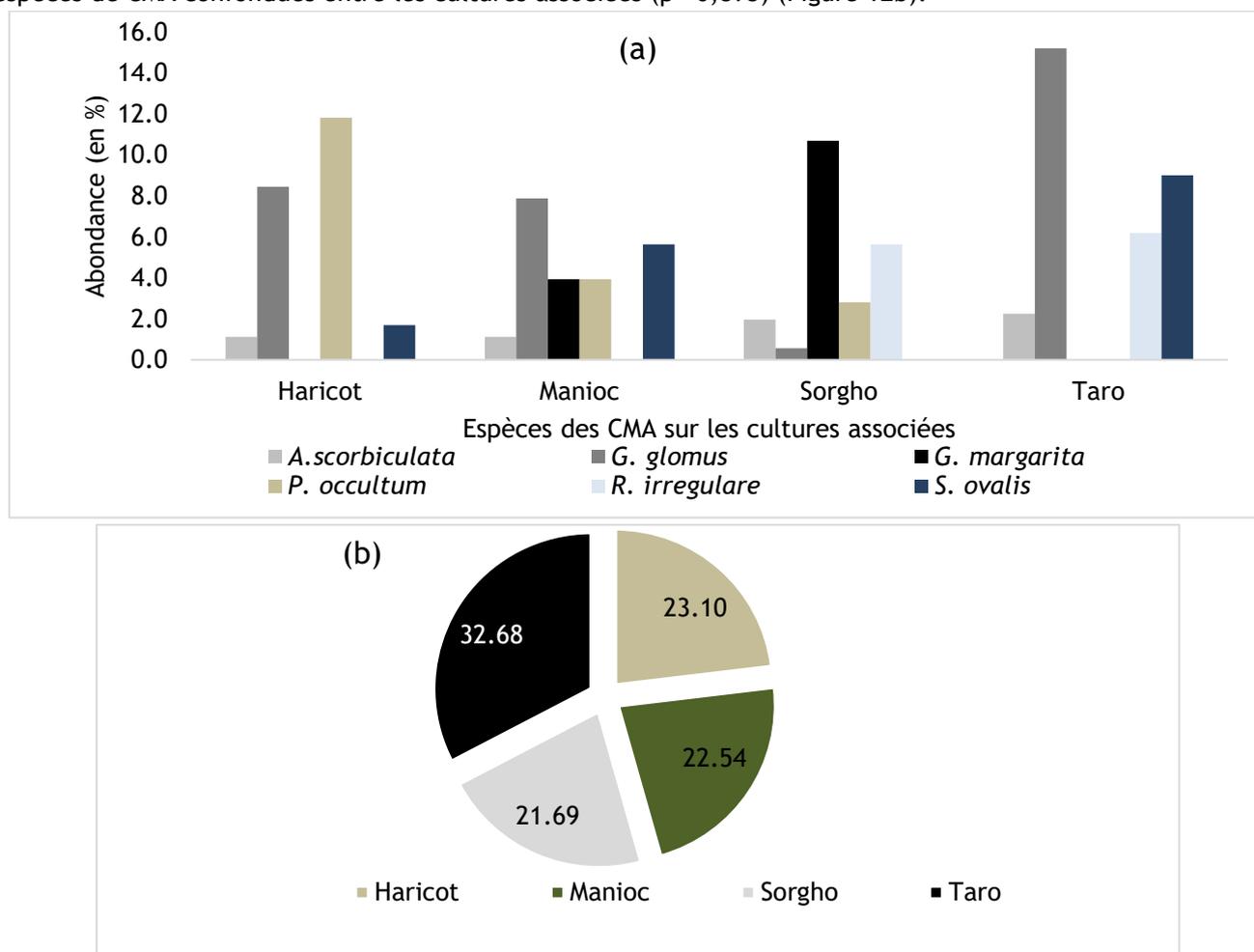


Figure 12 : Abondance des CMA sur les cultures associées selon les espèces (a) et selon les plantes hôtes (b)

La diversité des CMA dans la rhizosphère des plantes hôtes associées aux bananiers est caractérisée par des richesses spécifiques variant de 66,7 à 83,3%, soit 4 à 5 espèces parmi les 6 recensées (Figure 13a), des indices de Shannon de 1,05 à 1,47 (Figure 13b) et des indices d'uniformité variant de 59,6 à 75,1 % (Figure 13c). La diversité des CMA a été plus élevée dans la rhizosphère des plants de manioc (75,1% d'uniformité), suivie de taro et du sorgho (66% d'uniformité), et plus faible dans les racines de plants de haricot (59,6% d'uniformité). La richesse spécifique des CMA a été aussi nettement influencée par les plantes hôtes associées aux bananiers ($p < 0,001$). Les espèces *A. scorbiculata* et *G. glomus*, ont été omniprésentes dans les rhizosphères des plantes hôtes associées aux bananiers (avec 100% de fréquences d'occurrence). Par contre, les espèces *S. ovalis* et *P. occultum*, respectivement absentes dans rhizosphères de plants de taro et de sorgho, ont été constantes dans les rhizosphères des plantes hôtes (avec des fréquences d'occurrence de 75 % chacune). En fin, *G. margarita* et *R. irregulare*, particulièrement absentes dans les rhizosphères des plants de taro, avec des fréquences d'occurrence de 50%, se sont révélées des espèces régulières dans les rhizosphères des plantes hôtes associées aux bananiers (Figure 13d). Ainsi, l'intégration du Sorgho et du haricot dans les bananeraies est à encourager, en vue de promouvoir, d'une part le développement de *G. margarita* et *P. occultum* absents dans la rhizosphère du taro, et d'autre part, le développement de *S. ovalis* absent sur le sorgho.

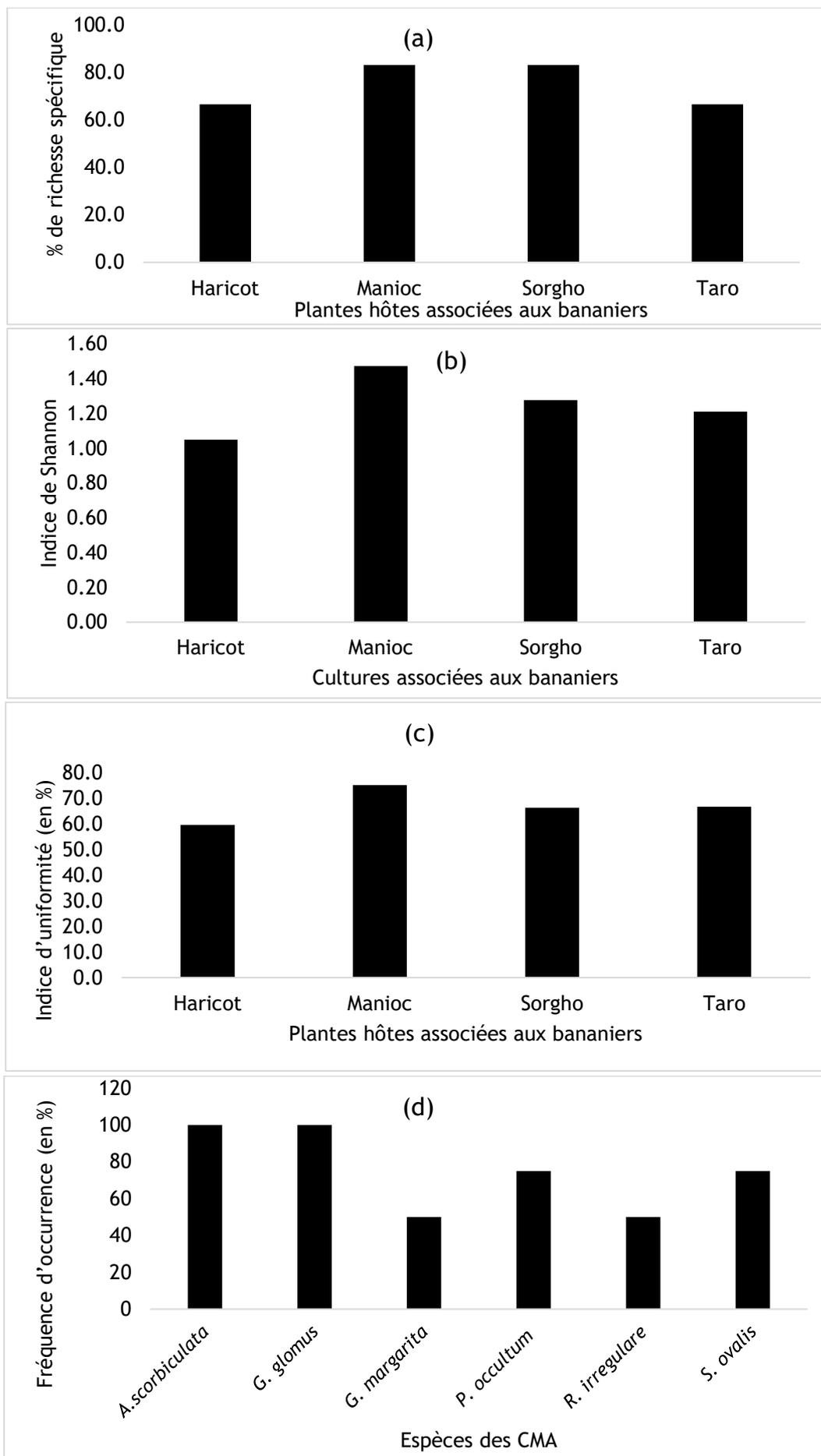


Figure 13: Richesse spécifique (a), Indice de Shannon (b), Indice d'uniformité (c) et Fréquence d'occurrence des espèces (d) des CMA dans la rhizosphère des bananiers selon les plantes hôtes

3.6. Mycorhization des plants de bananiers et de cultures associées au sein des modalités d'associations culturales

Le taux global de mycorhization des bananiers a été de 90% et a varié de 75 à 100% en fonction des modalités d'associations (Figure 14a-b). Bien que les différences ne soient pas significatives ($p = 0,201$), ce sont les associations Bananiers + Haricot (Harban), Bananier + Taro (Tarban), Bananiers + Taro + Sorgho (Tasoban) et Bananiers + Taro + haricot (Taharban) qui ont connu les faibles taux de mycorhization inférieurs à 90%.

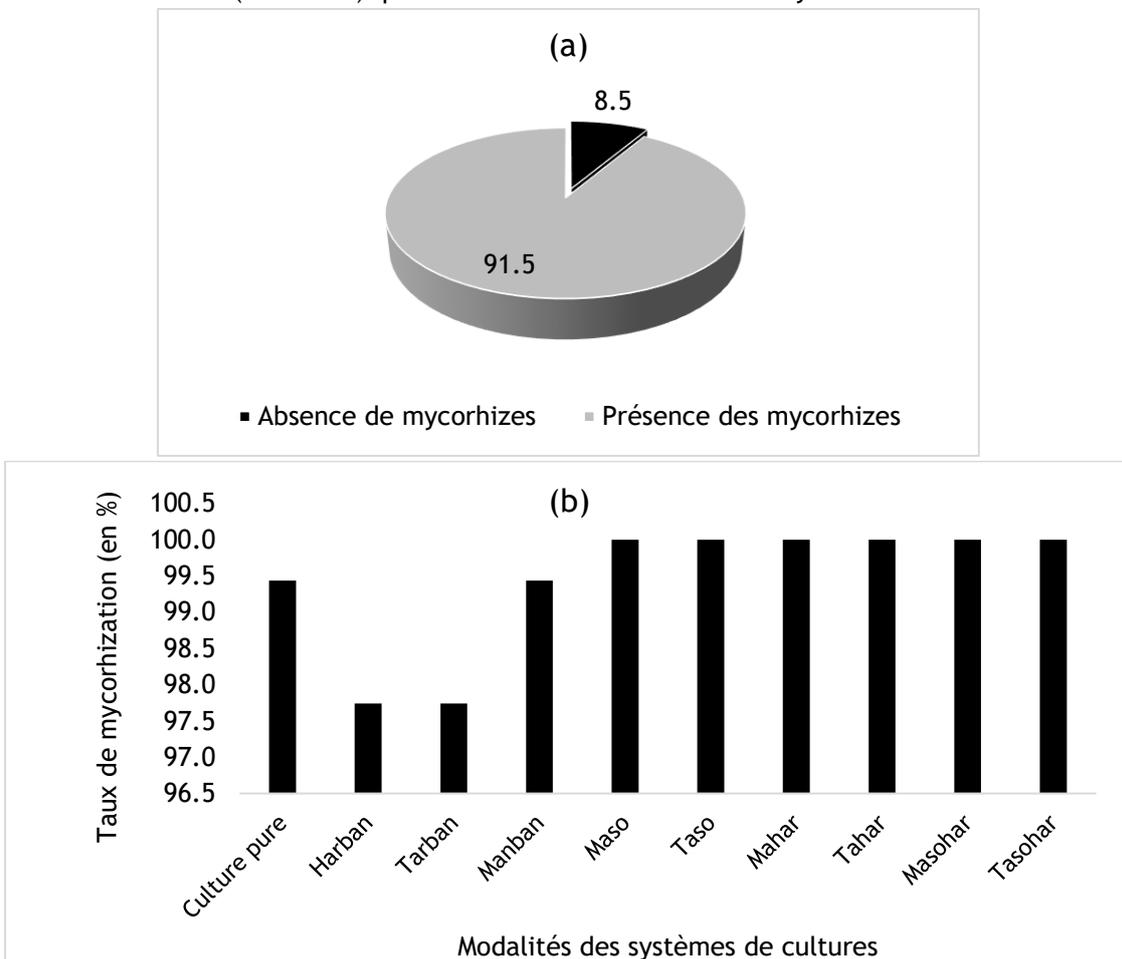
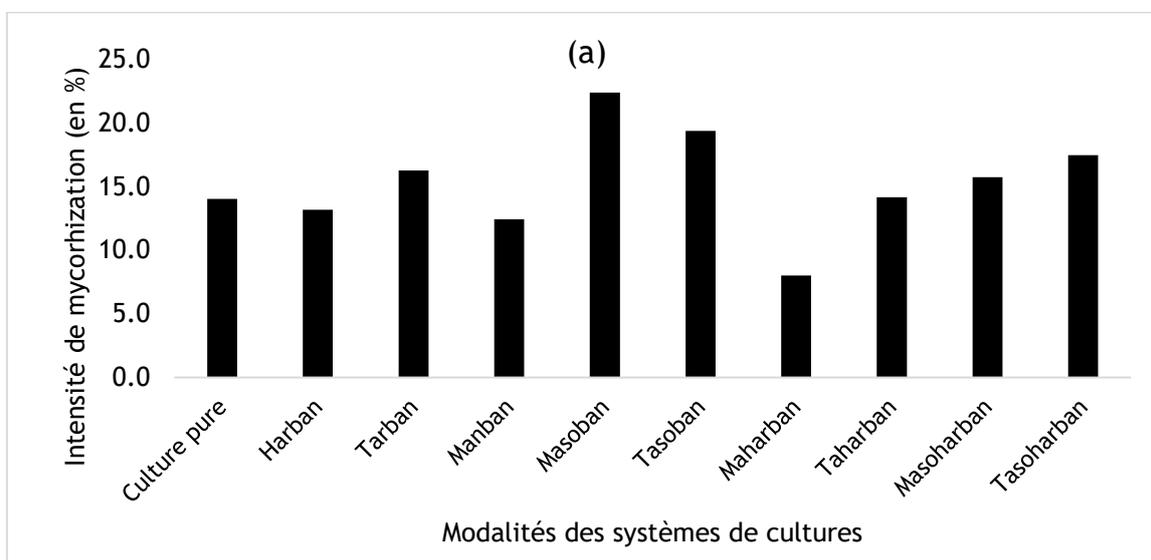


Figure 14 : Taux global de mycorhization des bananiers (a) et les modalités d'associations culturales (b)

L'intensité de mycorhization de bananiers a varié de 9 à 22,3% entre les modalités (Figure 15a) et 10,5 à 16,5% entre les groupes de bananiers (Figure 15b). Toutefois, elle ne montre pas des différences significatives tant entre les modalités ($p= 0,256$) qu'entre les groupes de bananiers ($p= 0,117$).



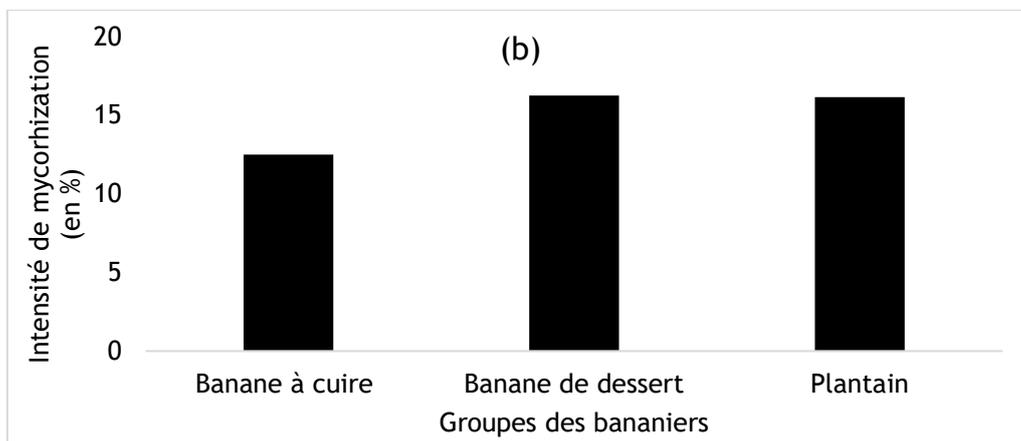


Figure 15 : Intensité de mycorrhization selon les modalités (a) et les groupes des bananiers (b)

L'intensité de mycorrhization de cultures associées a varié de 33 à 38 % (Figure 16a-b). Toutefois, elle ne montre pas de différences significatives entre les modalités d'associations culturales ($p= 0,899$) et les cultures associées ($p= 0,442$). Ainsi, l'intensité de mycorrhization des plants des bananiers n'est influencée par les modalités d'associations culturales.

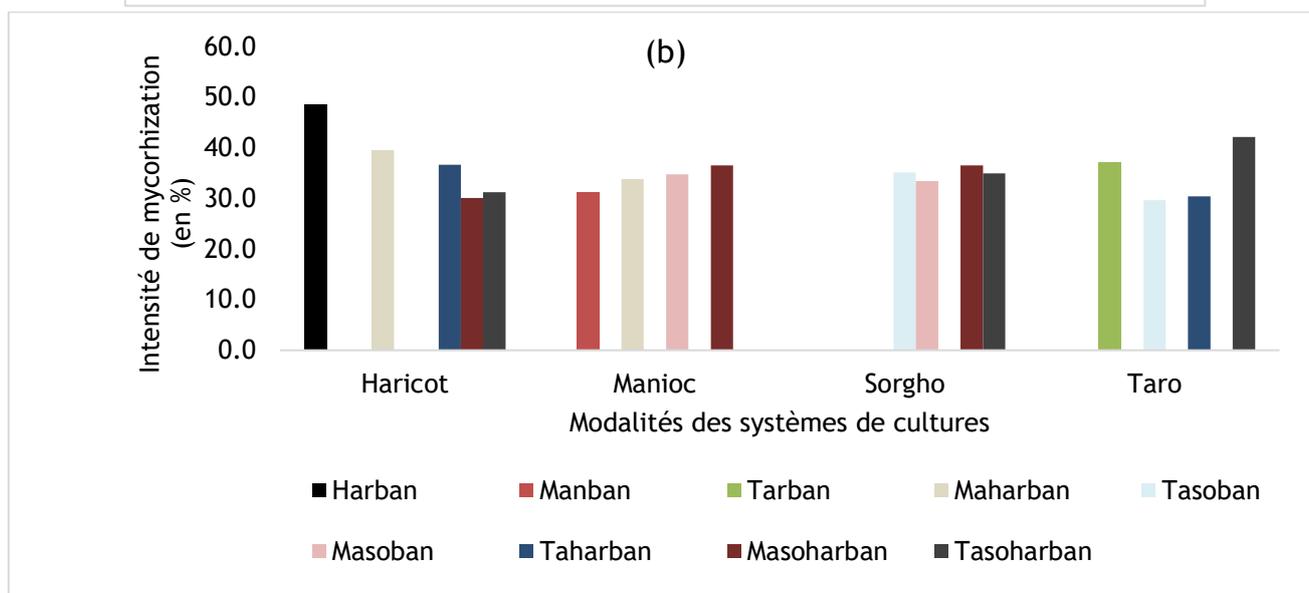
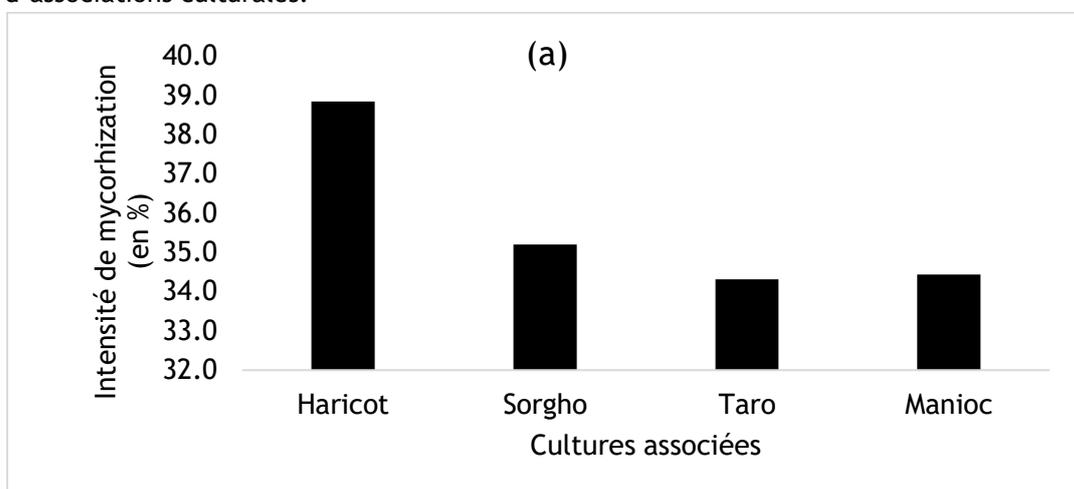


Figure 16: Intensité globale (a) et spécifique (b) de mycorrhization des plantes associées selon les associations culturales

3.7. Interaction entre l'abondance et diversité des CMA dans la rhizosphère des cultures associées et la mycorhisation des bananiers

L'abondance des CMA dans la rhizosphère des cultures associées ont nettement influencé la mycorhization des bananiers selon les espèces de cultures (Figure 17a) et les modalités d'associations culturales (Figure 17b).

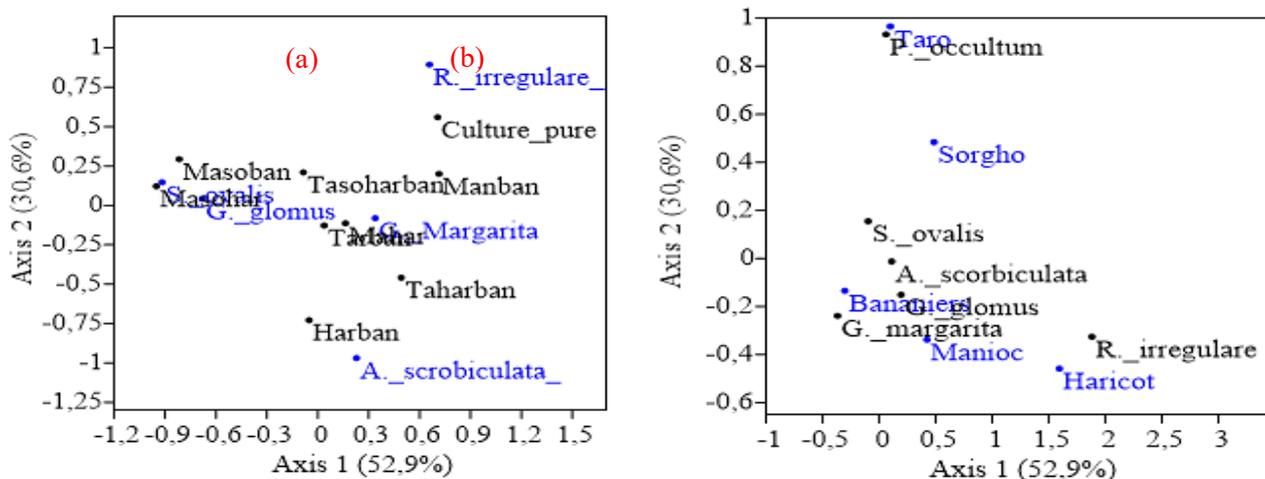


Figure 17: Abondance des CMA des cultures associées sur la mycorhization des bananiers selon les modalités (a) et les espèces de cultures (b)

Les abondances de *G. glomus*, *S. ovalis* et *A. scrobiculata* montrent de nettes indifférences vis-à-vis des espèces de cultures associées (Figure 18a). Le manioc a influencé l'abondance du *G. margarita* et le haricot celle de *P. occultum*. Par contre, le taro et le sorgho ont influencé l'abondance de *R. irregulare* (Figure 18b).

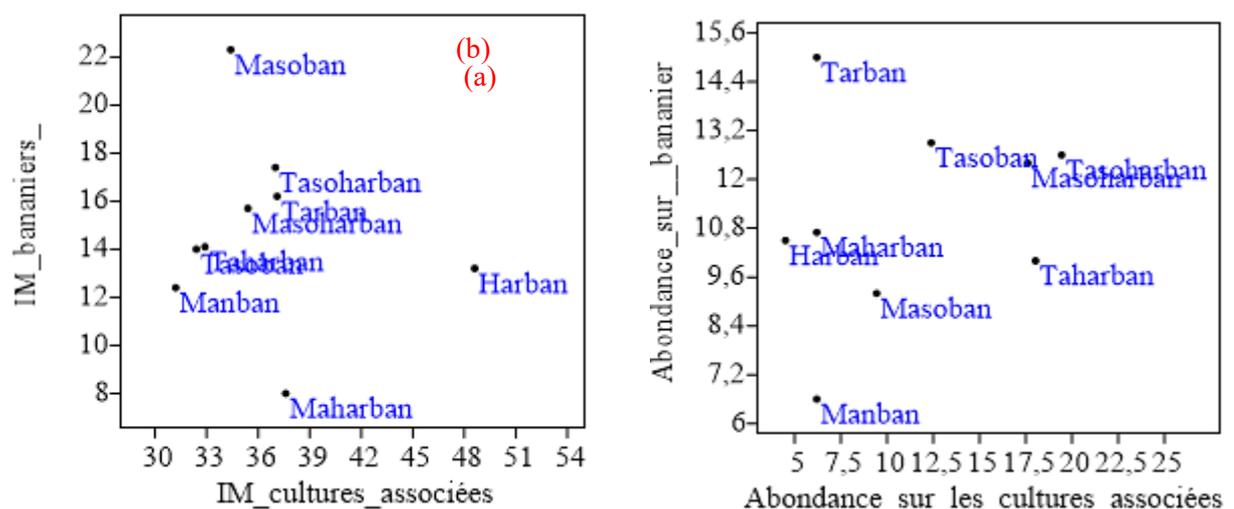


Figure 18: Symbiose mycorhizienne sur les bananiers selon l'abondance des CMA (b) et l'intensité de mycorhization (a) selon les modalités d'associations culturales

Par ailleurs, l'abondance et la diversité des CMA ainsi que l'intensité de mycorhization au niveau du taro et du sorgho influent mieux sur la mycorhization des bananiers (Figure 19a-b).

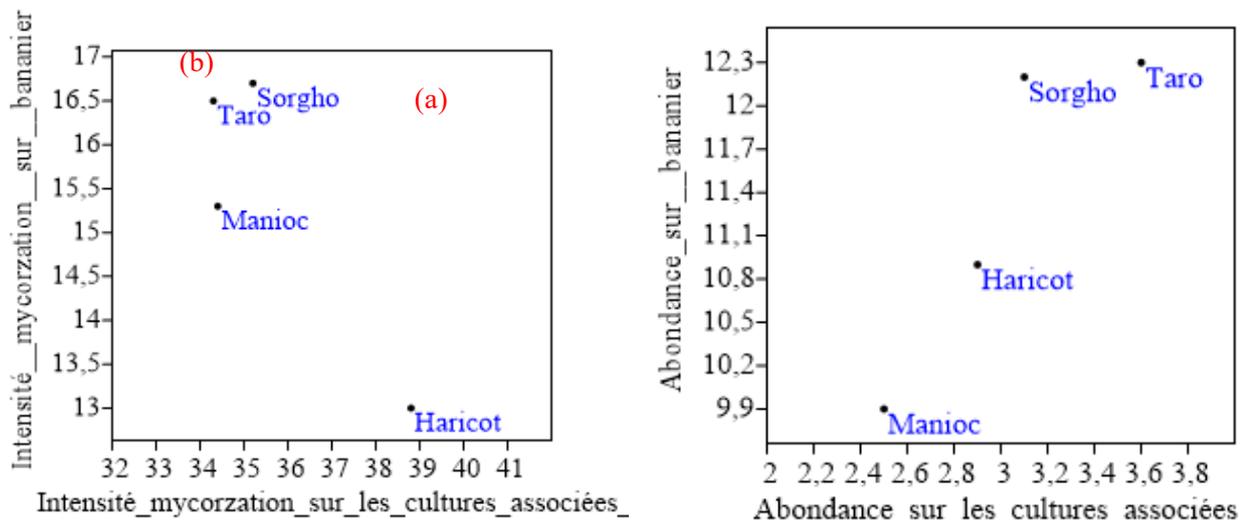


Figure 19: Symbiose mycorhizienne sur les bananiers selon l'intensité de mycorhization (a) et l'abondance des CMA (b) des cultures associées

3.8. Réponses des espèces des CMA vis-à-vis des caractéristiques physicochimiques des sols

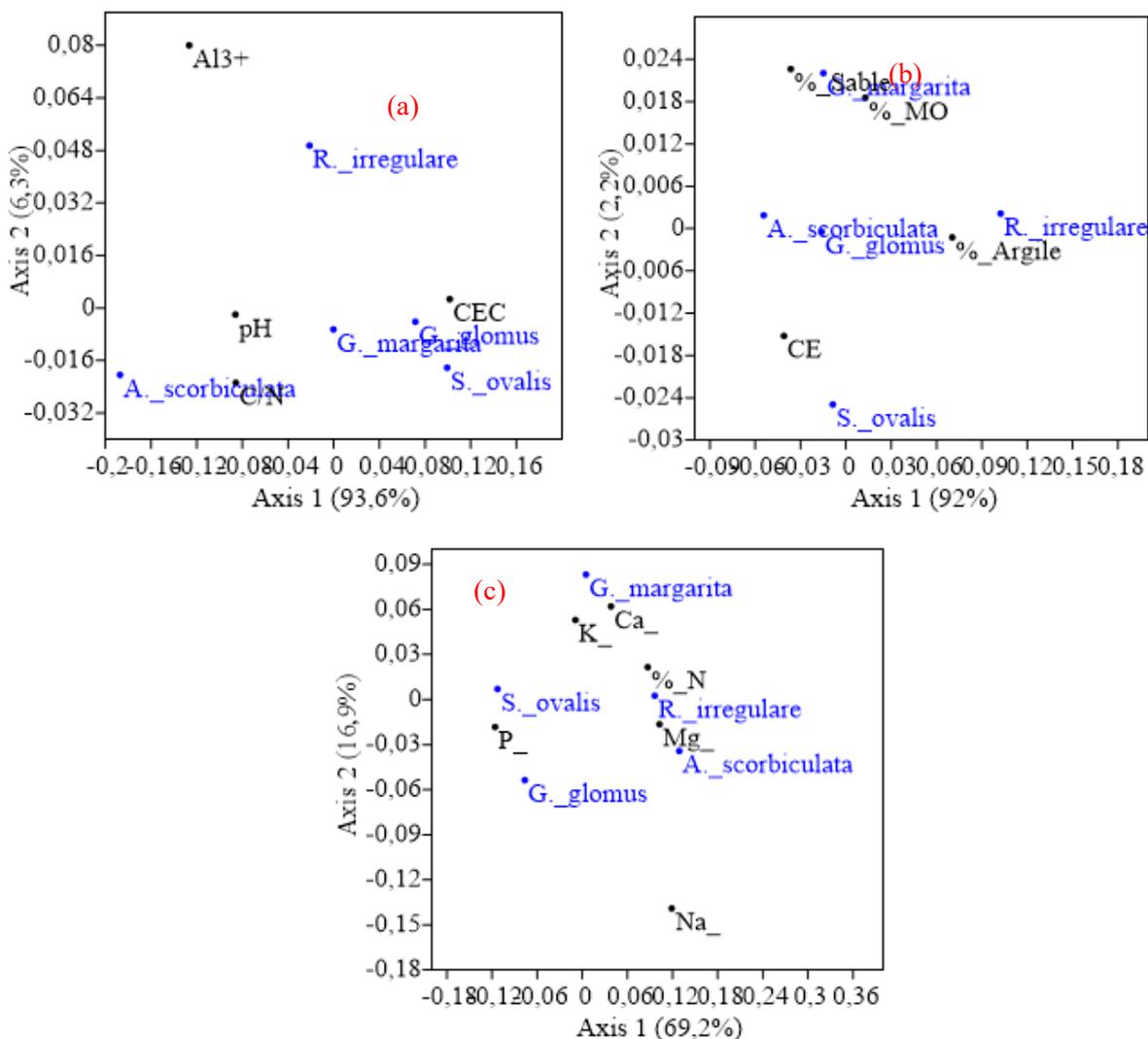


Figure 21: Influence des propriétés Physiques(a), Chimiques (b) et les teneurs en minéraux (c) des sols sur l'abondance des CMA

Le pH des sols n'exerce aucune influence sur les espèces des CMA. Bien qu'insensibles à l'acidité aluminique et au C/N, *G. margarita*, *G. glomus* et *S. ovalis* subissent une forte influence négative de la capacité d'échange cationique (CEC). Les espèces *A. scrobiculata* et *R. irregulare* subissent celle de l'acidité aluminique (Figure 20a). Cependant, *G. glomus* et *A. scrobiculata* se révèlent indifférents des caractéristiques physiques des sols. *G. margarita* subit une forte influence positive du sable et de la matière organique (MO), *R. irregulare* et *S. ovalis* subissent de fortes influences positives respectivement de l'Argile et de la conductivité électrique (CE) (Figure 20b). Les cations K^+ , Na^+ , Mg^{++} et Ca^{++} ainsi que N total et le P assimilable exercent de fortes influences sur *G. margarita*, *R. irregulare* et *A. scrobiculata* (Figure 20c).

4. DISCUSSION

Les CMA sont des champignons qui vivent en symbiose avec une gamme variée d'espèces végétales avec pour rôle fondamental l'amélioration de l'absorption des nutriments par ces dernières (Nyaku *et al.*, 2017 ; Khaliq *et al.*, 2002). De ce fait, que ce soit dans les écosystèmes naturels que dans les agrosystèmes, la grande majorité des plantes ont accès aux nutriments du sol et améliorent leurs performances dans des conditions de stress grâce à une symbiose avec des AMF (Marro *et al.*, 2022 ; Lugo *et al.*, 2023). Dans la présente étude, cinq différentes espèces de CMA ont été détectées dans les parcelles de bananiers et six dans les parcelles des cultures associées. Ces observations prouvent la richesse en CMA des systèmes de cultures à base de banane dans certaines régions de la RDC. En effet, Muliwambene *et al.*, (2020) et Kasaka *et al.* (2021) ont récemment rapporté la détection dans les systèmes de cultures de banane plantain de la région de Kisangani des CMA de genres *Glomus*, *Gigaspora*, *Acaulospora* et *Scutellospora*. En se référant aux études antérieures et la présente étude, il est constaté que l'occurrence des genres de CMA varie d'une zone à une autre et même d'un point à un autre dans une même exploitation agricole. Dans le cadre notre étude, les genres *Acaulospora* et *Glomus* ont été omniprésents dans les différentes modalités d'associations culturales pendant que *Scutellospora* et *Rhizophagus* y ont été respectivement régulier et occasionnel. Plusieurs études ont rapporté que la prédominance des genres *Glomus*, *Gigaspora* et *Acaulospora* serait due à leur adaptation aux conditions tropicales, d'une part, et au fait que leurs cycles de développement ne soient pas aussi affectés par les répétitions des cultures sur les terres (Oehl *et al.*, 2003 ; Bi-Voko, 2013). Par ailleurs, Brito *et al.*, (2012) estiment que leur prédominance serait attribuable à leur propagation essentiellement par les spores, qui sont des formes de résistance des CMA aux conditions difficiles. Par contre, celle de *Paraglomus*, *Scutellospora* et *Rhizophagus* se réalise plus par des hyphes, les fragments mycéliens extraracinaires. Ainsi, les CMA de genres *Glomus*, *Gigaspora* et *Acaulospora* seraient bien indiqués pour la réalisation d'inoculats commercialisables en Afrique tropicales. L'étude a révélé l'absence d'influence des associations culturales sur l'abondance et la diversité des CMA tant sur les bananiers que sur les cultures associées. Certains travaux ont également abouti à cette conclusion, infirmant ainsi l'hypothèse de l'impact de systèmes de cultures sur l'abondance et la diversité des CMA (Rivaton, 2016). Cependant, d'autres soutiennent cette influence (Gnamkoulamba *et al.*, 2018) et démontrent que la coexistence et la diversité des cultures au sein d'un agrosystème favorisent la diversité des CMA (Tedersoo *et al.*, 2016). La situation au Nord-Kivu pourrait s'expliquer par l'état avancé de dégradation des sols. Nombreux travaux antérieurs ont démontré que la dégradation (physique, chimique et biologique) des sols, les pratiques culturales (labour, défrichage, feux de brousse,...), les itinéraires techniques (monoculture en continu, ...) constituent de sérieux obstacles à la formation bénéfique de communautés de CMA (Sylvia, 1990 ; Jasper *et al.*, 1991 ; Hamel, 1996 ; Khaliq *et al.*, 2022). La récurrence au Nord-Kivu de ces facteurs perturbateurs expliquerait la faible abondance et diversité des CMA observée. L'absence de différences significatives d'abondance et de diversité des CMA, et même d'intensité de mycorhization entre les cultures associées observée dans la présente étude laisse penser à une répartition aléatoire et indépendante des CMA sur les cultures. Ces résultats divergent avec la théorie de leurs affinités avec les plantes hôtes, fondées sur un dialogue moléculaire (Chabani & Tehache, 2021), établi par les plantes en libérant dans leurs exsudats racinaires, de substances spécifiques auxquelles les CMA réagissent en produisant des molécules diffusibles dites « facteurs Myc » perçues par la plante (Gianinazzi, 1996 ; Stevenin, 2011). La reconnaissance moléculaire met en jeu les flavonoïdes et les strigolactones, qui sont des substances chimiques qui induisent chez le CMA l'expression du gène Myc puis de facteurs Myc, qui à leur tour vont induire la germination de la spore des CMA et la croissance orientée du mycélium en direction de la racine (Akiyama, 2007). Ce processus d'établissement de la symbiose expliquerait en partie les différences de fréquences d'occurrences des CMA entre les cultures associées aux bananiers à savoir cinq espèces sur le manioc et le sorgho et quatre espèces sur le haricot et le

taro. Dans la présente étude, les intensités de mycorhization aussi bien des plants de bananiers que des cultures, bien que relativement faibles, sont similaires aux résultats d'autres études antérieures comme le cas des travaux d' Elsen *et al.*, (2003) sur les bananiers dans les conditions expérimentales (13 à 24%), de Muliwambene *et al.*, (2020) dans le système agroforestier (28 à 32%). Par ailleurs, l'intensité de mycorhization des plants des bananiers n'était pas influencée par les modalités d'associations culturales. Selon Robdrup *et al.* (2024), dans un système d'associations culturales, les racines des cultures en présence sont susceptibles de se connecter entre elles par un réseau mycorhizien commun. Ce phénomène difficile à démontrer dans les expérimentations au champ (Robdrup *et al.*, 2024) ne se serait pas produit dans le cadre de cette étude probablement à cause de l'écartement entre les différentes parcelles élémentaires. Plusieurs travaux ont démontré l'influence des facteurs édaphiques sur les populations des CMA et le développement de leur symbiose sur les plantes. D'après Bi-Voko (2013), la mycorhization est d'autant plus grande que la disponibilité du P est faible dans le sol et que la CEC est élevée. Le pH a peu d'influence lorsqu'il est de 5,5 à 7,5, même si de fortes intensités de mycorhization aient été observées au pH de 6,5. En outre, le magnésium, l'argile et le limon ont établi de fortes corrélations positives avec la densité des CMA tandis que le sable fin et le sable grossier en ont établi de corrélations négatives. Les différences de composition de peuplements et de densités de spores des CMA sont essentiellement dues aux écarts de paramètres physico-chimiques entre les sols, en plus des pratiques culturales (Bossou *et al.*, 2019, Zhang *et al.*, 2022). Cette corrélation pourrait s'expliquer par le rôle majeur des mycorhizes dans la mobilisation pour la plante d'éléments nutritifs très peu mobiles dans le sol (Duponnois *et al.*, 2001 ; Khaliq *et al.*, 2022).

5. CONCLUSION

La présente étude montre que les bananiers établissent des relations symbiotiques avec les CMA dont cinq espèces dans la zone d'expérimentation: *Gigaspora margarita* le plus abondant, suivi de *Glomus glomus* et de *Scutellospora ovalis* qui sont assez bien réguliers, puis de *Rhizophagus irregulare* et d'*Acaulospora scrobiculata* les moins abondants. L'abondance et la diversité des CMA tant sur les bananiers que sur les cultures associées, sont indépendantes aussi bien des espèces des cultures hôtes que des modalités d'associations culturales. Ce qui corrobore l'idée d'une répartition aléatoire et indépendante des CMA sur les cultures. Enfin, les CMA réagissent diversement aux caractéristiques physico-chimiques des sols : nette indifférence de *Glomus* et *Acaulospora*, face à la forte influence positive du Sable et de la MO sur *Gigaspora*, de l'Argile sur *Rhizophagus* et de la CE sur *Scutellospora*. Le pH semble ne pas avoir d'influence sur les CMA alors qu'ils en subissent pour la CEC, l'acidité aluminique, le P, le Ca⁺⁺, le Mg⁺⁺ et le K⁺.

REMERCIEMENTS : Nous tenons à remercier les Pr Dhed'a D. et Onautshu O., responsables du laboratoire de biotechnologie de l'Université de Kisangani ainsi que ses techniciens Kasaka L. et Assumani M. pour l'initiation à l'étude de CMA. Un grand merci à nos étudiants de l'Université Officielle de Semuliki de Beni pour leur participation aux manipulations de laboratoire.

CONFLIT D'INTERET : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts

CONTRIBUTION DES AUTEURS : TML a conduit le travail et rédigé le manuscrit ; VJD et JDF ont participé à la conception, à l'élaboration des protocoles et ont supervisé le travail. AF a participé aux analyses et interprétation des données ainsi qu'à la préparation du manuscrit. Tous les auteurs ont lu et approuvé la version finale du manuscrit.

RÉFÉRENCES

- Affokpon A, Coyne D, Lawouin L, Tossou C, Dossou R and Coosemans J, (2011). Effectiveness of native West African arbuscular mycorrhizal fungi in protecting vegetable crops against root-knot nematodes. *Biology and Fertility of Soils* 47:207-217. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0525-1>
- Akiyama K, (2007). Chemical identification and functional analysis of apocarotenoids involved in the development of arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Bioscience biotechnology and biochemistry*, 71(6): 1405- 1414.
- Begum N, Qin C, Ahanger M, Raza S, Khan M, Ashraf M, Ahmed N and Zhang L, (2019). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10:1068-1082. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>

- Bi-Voko D, Ahonzo-Niamke S, and Zeze A (2013). Impact des propriétés physicochimiques des sols de culture du manioc sur l'abondance et la diversité des communautés de champignons mycorrhiziens à arbuscules dans la zone agroécologique d'Azaguie, Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine* 25 (3) : 251 - 264.
- Bolyen E, Rideout J, Dillon M, Bokulich N, Christian C, Abnet C, Ghalith G, Harriet A, Alm E, Silva R, Diener C, Dorrestein P, Gavin M, Douglas, and Caporaso J, (2019). Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2. *Nature Biotechnology* (37): 852-857. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0209-9>
- Bossou R, Houngnandan H, Adandonon A, Zoundji C, and Houngnanda P, (2019). Diversité des champignons mycorrhiziens arbusculaires associés à la culture du maïs (*Zea mays* L.) au Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 13(2): 597-609, DOI:<https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i2.2>
- Brito I, Goss M, Carvalho M, Chatagnier O and van Tuinen D, (2012). Impact of tillage system on arbuscular mycorrhiza fungal communities in the soil under Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research*, 121, 63-67. <https://doi:10.1016/j.still.2012.01.012>
- Chabani R & Tehache S, (2021). *Synthèse bibliographique sur les mycorhizes techniques et applications*, Mémoire, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 76p.
- Chen G, Wang C and Shi T, (2011). Overview of available methods for diverse RNA-seq data analyses. *Science China Life Sciences*, (54):1121-1128. <https://doi:10.1007/s11427-011-4255-x>
- Debashis K, & Somdatta G, (2022). Aspect, problems and utilization of Arbuscular Mycorrhizal (AM) application as bio-fertilizer in sustainable agriculture. *Current Research in Microbial Science*, 3: 100-107. <https://doi:10.1016/j.crmicr.2022.100107>
- Delstanche S, (2011). *Drivers of soil fertility in smallholder banana systems in the African Great Lakes Region*. PhD-dissertation, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 458p
- Deogratias D, & Cannesan M, (2018). *La biotisation des sols et des substrats : Méthodes alternatives en protection des plantes*, Guide technique, Astredhor, 25p
- Deogratias J, Darles B, Triolet M, Jouannic R, and Gerbore J, (2015). *Evaluation de l'efficacité de différents produits de biocontrôle à base de microorganismes antagonistes, pour lutter contre la fusariose du Dipladenia*. 5e conférence internationale sur les méthodes alternatives de protection des cultures. AFPP, Lille, 11-13 mars 2015.
- Dey M & Ghosh S, (2022). Arbuscular mycorrhizae in plant immunity and crop pathogen. *Control Rhizosphere*, 22 : 137-144. <https://doi:10.1016/j.rhisph.2022.100524>
- Dupaigre B, (2015). Changement climatique : un défi de plus pour l'agriculture en Afrique. *Perspectives 2050 pour la sécurité alimentaire et la productivité agricole*, Note n° 8 - Octobre 2015 FARM, 145-152
- Duponnois R, Plenchette C, Thioulouse J and Cadet P, (2001). The mycorrhizal soil infectivity and arbuscular mycorrhizal fungal spore communities in soils of different aged fallows in Senegal. *Applied Soil Ecology*, 17 (3) : 239-251.
- Elsen A, Beeterens R, Swennen R and De Waele D, (2003). Effects of an arbuscular mycorrhizal fungus and two plant-parasitic nematodes on *Musa* genotypes differing in root morphology, *Biol Fertil Soils* 38:367-376.
- Filion M, St-Arnaud M and Fortin J, (1999). Direct interaction between the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* and different rhizosphere microorganisms. *New Phytologist*, 141, 525-533.
- Gianinazzi V, (1996). Plant cell responses to arbuscular mycorrhizal fungi: getting to the roots of the symbiosis. *Plant Cell* 8: 1871-1883.
- Gnamkoulamba A, Tounou A, Tchabi A, Agboka K, Adjévi A, Kossi M, and Batawila K, (2018). Prévalence et diversité des spores des champignons mycorrhiziens arbusculaires en culture de riz sous les différents systèmes de culture de riz au Togo. *J. Appl. Biosci.* 126: 12647-12664. <https://dx.doi.org/10.4314/jab.v126i1.3>
- Gurr G, Wratten S, Landis D and You M, (2017). «Habitat Management to Suppress Pest Populations: Progress and Prospects ». *Annu. Rev. Entomol.* 62, 91-109, doi:10.1146/annurev-ento-031616-035050.

- Hamel C, (1996). Prospects and problems pertaining to the management of arbuscular mycorrhizae in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 60: 197-210.
- Hamid A & Collion A, (2004). Etude microbiologique de quelques sols des forêts sclérophylles de Nouvelle-Calédonie. *Rapport de recherche de l'Université de la Nouvelle-Calédonie*, Nomea, 53p
- HLPE, (2012). *Sécurité alimentaire et changement climatique*. Rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition du Comité de la sécurité alimentaire mondiale, Rome, 86p.
- Hnini M, Rabeh K and Oubohssaine M, (2024). Interactions between beneficial soil microorganisms and host plants for environmental restoration: A systematic review. In "Role of Microorganisms in Plant Growth, Stress Amelioration and Phytoremediation. *Plant Stress* 11,100-391, <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100391>
- Husna, Tuheteru F and Arif A, (2017). «Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Plant Growth on Serpentine Soils». In: *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants*. Springer, Singapore, 43 - 66
- INS, (2022). *Annuaire statistique et Indices des prix à la consommation*, Revue annuelle du ministère de Plan de la RDC. Commission des études statistiques et des comptes nationaux, Kinshasa, 256p.
- Illumina Inc, (2021). *Sequencing Read Length How to calculate NGS read length*.
- Jasper D, Abbot L and Robson D, (1991). The effect of soil disturbance on vesiculararbuscular mycorrhizal fungi in soils from different vegetation types. *New Phytologist*, 118: 471-476
- Kasaka D, Onautshu O, Muliwambene K, Lebisabo B, Baert G, Swennen R, Haesaert G and Dhed'a D, (2021). Importance and diversity of Mycorrhizae under plantain cultivation in the slash-and-burn and non-burn cropping systems in the forest region of Kisangani, Tshopo Province, D.R. Congo. *African Journal of Agricultural Research* 17(6):809-821, doi: 10.5897/AJAR2020,15411.
- Khaliq A, Perveen S, Alamer K, Zia U, Rafique Z, Alsudays I, Althobaiti A, Saleh M, Hussain S and Attia H, (2022). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Symbiosis to Enhance Plant-Soil Interaction. *Sustainability*, 14, 78-140. <https://doi.org/10.3390/su14137840>
- Lugo M, Ontivero R, Iriarte H, Yelikbayev B, and Pagano M, (2023). The Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Their Associations in South America: A Case Study of Argentinean and Brazilian Cattle Raising Productive Ecosystems: A Review. *Diversity* 15, 1006-1032, <https://doi.org/10.3390/d15091006>
- Magurran A, (2003). Measuring biological diversity. *J Blackwell publishing*, Oxford, UK, 65p.
- Makiso L, Dzokou V, Affokpon A and Djeugap F, (2025). 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). *Afrique Science* 26(1):31- 43, <http://www.afriquescience.net>
- Malézieux E, (2012). «Designing cropping systems from nature ». *Agr Sust Dev* -32:152-169.
- Marro N, Grilli G, Soteras F, Caccia M, Longo S, Noelia N, Borda V, Burni M, Janouskov M and Urcelay C, (2022). The effects of arbuscular mycorrhizal fungal species and taxonomic groups on stressed and unstressed plants: a global meta-analysis. *New Phytologist* 235:320-332. <http://doi.org/10.1111/nph.18102>
- McGettigan P, (2013). Transcriptomics in the RNA-seq, *Current Opinion in Chemical Biology*, (17):4-11
- MinPro de plan, (2017). *Localisation des Objectifs de développement durable dans le Nord-Kivu*, Rapport provincial, OCDD - RD Congo, Goma.
- Muliwambene K, Kasaka D, Onautshu O, Haesaert G, Swennen R, and Dhed'a D, (2020). Agrosystems and Mycorrhizae of Plantain (Musa AAB subgroup) in the Forest Region of Kisangani in DR Congo: Abundance and Diversity. *Agricultural and Food Science Journal of Ghana*.13:1209 - 1224, doi: 10.3389/fsoil.2022.979246.
- Nasslahsen B, Prin Y, Ferhout H, Smouni A and Duponnois R, (2022). Mycorrhizae helper bacteria for managing the mycorrhizal soil infectivity. *Frontiers in Soil Science* 2:979-1246. <https://doi:10.3389/fsoil.2022.979246>
- Oehl F, Sieverding E, Ineichen K, Mader P, Boller T and Wiemken A, (2003). Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of Europe. *Applied Environmental Microbiology* 69: 2816 - 2824.

- Rivaton D, (2016). *Etude des champignons mycorhiziens arbusculaires des sols en systèmes de grandes cultures biologiques sans élevage. Application à la nutrition phosphatée*, Mémoire de fin d'Etudes, Agrocampus Ouest, Rennes, 105p.
- Robdrup M, Hubbard M, Gorim L, Gorzelak M, (2024). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Under Intercrop, Regenerative, and Conventional Agriculture Systems. In: Ahammed, G.J., Hajiboland, R. (eds) *Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Higher Plants*, Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-99-8220-2_13
- Stevenin A, (2011). *Symbiose mycorhizienne : développement de nouvelles méthodes pour la synthèse de glycoconjugués bioactifs*. Thèse de doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 245p
- Tedersoo L, Bahram M, Cajthaml T, Põlme S, Hiiesalu I, Anslan S, Harend H, Buegger F, Pritsch K, Koricheva J and Abarenkov K, (2016). Tree diversity and species identity effects on soil fungi, protists and animals are context dependent. *ISME J.* 10, 346-362. <https://doi:10.1038/ismej.2015.116>
- Trouvelot A, Kough J and Gianinazzi-Pearson V, (1986). Mesure du taux de mycorhization d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. In : *Physiological and genetical aspects of mycorrhizae*, ed. INRA Presse, Paris, 217-221, <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=8758731>
- Vikanza K, (2011). *Aires protégées, espaces disputés et développement au Nord-Est de la R D Congo*. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, 343p
- Walker C, (2013). *The molecular approach to the taxonomy of Arbuscular mycorrhizal fungi and relatives. Foundations of a natural classification*, TU Darmstadt, Germany, 123p
- Wu Q, Silva F, Hijri M and Kapoor R, (2023). Editorial: Arbuscular mycorrhizae-mediated augmentation of plant secondary metabolite production. *Front. Plant Sci.* 14:1150900. <https://doi:10.3389/fpls.2023.1150900>
- Zhang M, Yang M, Shi Z, Gao J & Wang X, (2022). Biodiversity and variations of arbuscular mycorrhizal fungi associated with roots along elevations in Mt. Taibai of China. *Diversity*, 14: 626-639. <https://doi.org/10.3390/d14080626>