

Table de matières

Dédicaces	i
Remerciements.....	ii
Table de matières	iv
LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES	vi
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES PHOTOS	viii
LISTE DES TABLEAU	viii
Résumé.....	x
Abstract.....	xii
INTRODUCTION	1
I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
I.1 L'agroforesterie	4
I.2 Les espèces ligneuses étudiées	6
I.2.1 <i>Vachellia senegal</i> (L.) Wild	6
I.2.2 <i>Balanite aegyptiaca</i> (L.) Del.	9
I.2.3 Le niébé [<i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp.].....	11
I.3 Symbioses mycorhiziennes	13
I.3.1 Généralités sur les mycorhizes.....	13
I.3.2 Les différents types de mycorhizes	14
I.3.3 Rôle de la symbiose mycorhizienne à arbuscules	19
II. MATÉRIEL ET MÉTHODES	22
II.1 Présentation de la zone d'étude	22
II.1.1 Caractéristiques Bioclimatiques	22
II.1.2 La Grande Muraille Verte	24
II.1.3 Le site d'étude	26
II.1.4 Enquêtes sur la perception de l'agriculture dans le Ferlo.....	26
II.1.5 Matériel végétal.....	27
II.1.6 Dispositif expérimental	27
II.1.7 Conduite de la culture.....	29
II.1.8 Paramètres mesurés	29
III. RESULTATS	34
III.1 Savoir-faire et perceptions sur les pratiques agricoles dans le Ferlo : le cas de la culture du niébé	34
III.1.1 La production de niébé	34
III.1.2 Utilisation des intrants	34

III.1.3	Gestion des résidus de récoltes.....	35
III.1.4	Avenir de l'agriculture dans le département de Ranérou, Ferlo	36
III.2	Effet des espèces ligneuses sur la culture du niébé	36
III.2.1	Sur le potentiels infectieux mycorhizogènes des sols cultivés (MPN)	36
III.2.2	Sur les paramètres de mycorhization	37
III.2.3	Sur les paramètres de croissance	41
III.2.4	Sur la biomasse du niébé	45
III.2.5	Sur le rendement du niébé.....	49
IV.	Discussion	50
IV.1	Perception de la population sur les pratiques agricoles.....	50
IV.2	Effet de <i>Vachellia senegal</i> Willd et <i>Balanites aegyptiaca</i> Del sur les paramètres étudiés....	51
IV.3	Potentiel agroforestier de la zone sylvo-pastorale de Ranérou (Ferlo).....	54
CONCLUSION		55
Référence Bibliographique.....		57
ANNEXES		68

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

APG	Angiosperms Phylogeny Group (Groupe phylogénique des Angiospermes)
N	Azote
P	Phosphore
°C	Degré Celsius
mm	millimètre
Kg	Kilogramme
t	tonne
m	mètre
ha	hectare
MA	Mycorhiziens Arbusculaire
ARNs	Acide Ribonucléique
MPN	Most Probable Number (Nombre le Plus Probable)
µm	micromètre
PPA	<i>Pre-Penetration Apparatus</i> (Appareil de Pré-Pénétration)
pCO ₂	Pression partielle de gaz carbonique
Km	kilomètre
Km ²	kilomètre carré
m ²	mètre carré
RH	Relative Humidity (Humidité Relative)
HC	Hors Couvert
JAS	Jour Après Semi
KOH	Hydroxyde de Potassium
HCl	Chlorure d'Hydrogène
ml	millilitre

gr gramme

mn minute

h heure

D dilution

Jrs jours

p p-Value

Df degré de liberté

ANGMV Agence Nationale de la Grande Muraille Verte

GMV Grande Muraille Verte

ISRA Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

UMI Unité Mixte Internationale

CNRS Centre National de la Recherche Scientifique

ANCAR Agence Nationale de Conseil Agricole et Rural

DEFCCS Direction des Eaux et Forêts, Chasses et Conservations des Sols

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Les différents types de mycorhizes (d'après Halle, 2008)	15
Figure 2 : Etablissement de la symbiose endomycorhizienne (Genre & Bonfante , 2007) modifiée par (Parniske, 2008)	18
Figure 3 : Variabilité pluviométrique inter-annuelle de la période 1980 à 2019 de la région de Matam (ANACIM, 2019)	23
Figure 4 : Diagramme ombrothermique de la région de Matam de 1980 à 2019.....	23
Figure 5: Tracé de la GMV en Afrique (Anon., 2017)	25
Figure 6: Tracé de la Grande Muraille Verte au Sénégal (Cisse & Sarr, 2012)	26
Figure 7: Parcelle élémentaire de culture du niébé sous couvert	28
Figure 8: Systèmes de notation des taux de mycorhization des fragments	31
Figure 9: utilisation des fertilisants dans les champs	35
Figure 10: Répartition des résidus issus des récoltes	35
Figure 11: Perception par la population sur l'avenir pour l'agriculture dans le département de Ranérou	36
Figure 12: Fréquences de mycorhization du niébé	38
Figure 13: Fréquences de mycorhization du niébé suivant la position autour de l'arbre.	38
Figure 14: Intensités de mycorhization du niébé.....	39
Figure 15: Intensités de mycorhization suivant la position autour de l'arbre.....	40
Figure 16 : Intensités de mycorhization du niébé sous couvert.....	40
Figure 17 : fréquences de mycorhization du niébé sous couvert.....	40
Figure 18: Hauteurs du niébé à 20 et 30 JAS après semis suivant la position par rapport à l'arbre	42
Figure 19: Nombre de ramifications du niébé dans les différentes sous parcelles.....	42
Figure 20: Nombre de ramifications suivant la position des plants par rapport à l'arbre.	43
Figure 21: Croissance en hauteur du niébé suivant l'écartement avec l'arbre.	44
Figure 22: nombre de ramifications du niébé suivant l'écartement avec l'arbre.	45
Figure 23: Biomasses aérienne du niébé à 30 JAS.	45
Figure 24: Biomasses racinaire du niébé à 30 JAS.	46
Figure 25: Biomasse racinaire du niébé selon la direction à 30 JAS.	47
Figure 26: Biomasse aérienne du niébé selon la direction à 30 JAS.	47
Figure 27: Biomasses aérienne du niébé suivant l'écartement avec le pied de l'arbre à 30 JAS.	48
Figure 28: Biomasses racinaire du niébé suivant l'écartement avec le pied de l'arbre à 30 JAS.	48
Figure 29: Productivité du niébé a la récolte.	49

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: semence de niébé de la variété Mélakh	27
Photo 2: culture de niébé sous <i>Balanites aegyptiaca</i>	28
Photo 3: Mesure de la hauteur du Niébé.....	29
Photo 4 : Pots avec du maïs semé en serre sur les gammes de dilutions de sol.....	33
Photo 5: Racine de niébé mycorhizée.....	37

LISTE DES TABLEAU

Tableau 1: Fractions de dilution des sols pour le MPN	32
Tableau 2: Potentiel infectieux mycorhizogène des sols cultivés	37

Résumé

L'utilisation des espèces agroforestières, à usages multiples peut restaurer la productivité agricole plus rapidement que les jachères naturelles. L'objectif global de ce travail est d'améliorer la productivité des cultures annuelles dans le Ferlo par la valorisation des communautés microbiennes (champignons MA) associés aux espèces forestières. Spécifiquement, il s'agit d'étudier la perception et les connaissances des habitants de la zone de Ranérou sur les pratiques agricoles et leurs évolutions dans le temps, estimer le potentiel de mycorhization et d'évaluer l'impact de l'arbre sur : la croissance de plants de cultures annuelles (niébé) ; la productivité et les paramètres de mycorhization. La culture a été réalisée sur 24 parcelles élémentaires de 51,81 m² (7,2m/7,2m) avec des écartements de 60X60cm avec huit répétitions témoin (hors couvert) et seize sous couvert (huit sous *Balanites* et huit sous *Vachellia*). Le niébé utilisé est la variété Mélékh sélectionnée par l'ISRA de Bambey. Les résultats montrent que le potentiel de mycorhization (MPN) a diminué après la récolte du niébé dans les parcelles élémentaires en sous couvert, alors qu'il a augmenté dans en HC. L'observation des racines de niébé de 30 JAS montrent que les fréquences de mycorhization sont statistiquement plus élevées ($p=0,028$) quand le niébé est cultivé sans présence ligneuse (98,33 %) qu'en association avec *balanites* (86,83 %) ou *Vachellia* (79,87 %). L'intensité est statistiquement plus élevée ($p=0,078$) chez les témoins (32,85 %) qu'avec les espèces ligneuses (18,32 % et 16,91 % respectivement pour *Balanites* et *Vachellia*). A dix jours après semis, des plants de niébé ont été arrachés suivant les quatre directions autour de l'arbre à respectivement 1,2 m, 2,4 m 3,6 m. Sous *Balanites aegyptiaca*, la biomasse aérienne du niébé est plus développée (2,13 g) mais ne diffère pas statistiquement avec celles des plants des parcelles témoins (0,9 g), elle est plus faible sous *Vachellia senegal* (0,477 g). La biomasse racinaire du niébé est statistiquement plus importante ($p=0,007$) dans les sous-parcelles à *Balanites* (0,38 g), intermédiaires chez les témoins (0,21 g) et plus faible dans les sous-parcelles à *Vachellia* (0,18 g). La croissance en hauteur du niébé dans le premier mois montre qu'elle est plus rapide sous *Balanites* puis sous *Vachellia* que pour les témoins. Cependant la ramification latérale du niébé n'a pas significativement évolué entre les différentes sous-parcelles ($p=0,24$). A la récolte, les rendements obtenus sont nettement meilleurs ($p=0,09$) sous *Balanites* et plus faibles dans les sous-parcelles témoins et intermédiaires sous *Vachellia* dans une zone où les pratiques agricoles sont compatibles à l'usage de techniques ou technologies agroforestières.

Mots clefs : agroforesterie, *Balanites aegyptiaca*, *Vachellia senegal*, *Vigna unguiculata*, mycorhization, champignon MA.

Abstract

The use of agroforestry, multipurpose species can restore agricultural productivity faster than natural fallows. The overall objective of this work is to improve the productivity of annual crops in Ferlo by enhancing the microbial communities (MA fungi) associated with forest species. Specifically, it involves studying the perception and knowledge of the inhabitants of the Ranérou area on agricultural practices and their changes over time, estimating the potential for mycorrhization and assessing the impact of the tree on : the growth of annual crop plants (cowpea) ; productivity and mycorrhization parameters. The culture was carried out on 24 elementary plots of 51.81 m² (7.2m / 7.2m) with spacings of 60X60cm with eight control repetitions (excluding cover) and sixteen under cover (eight under *Balanites* and eight under *Vachellia*). The cowpea used is the Mélékh variety selected by ISRA Bambey. The results show that the mycorrhization potential (MPN) decreased after harvesting cowpea in elementary plots under cover, while it increased in control. The observation of cowpea roots from 30 JAS show that the frequencies of mycorrhization are statistically higher ($p = 0.028$) when cowpea is grown without woody presence (98.33%) than in association with *Balanites* (86.83%) or *Vachellia* (79.87%). The intensity is statistically higher ($p = 0.078$) in the controls (32.85%) than in the woody species (18.32% and 16.91% respectively for *Balanites* and *Vachellia*). Ten days later, cowpea plants were uprooted in four directions around the tree at 1.2 m, 2.4 m, 3.6 m respectively. Under *Balanites aegyptiaca*, the aerial biomass of cowpea is more developed (2.13 g) but does not differ statistically with that of plants in control plots (0.9 g), it is lower under *Vachellia senegal* (0.477 g). The root biomass of cowpea is statistically higher ($p = 0.007$) in the *Balanites* sub-plots (0.38 g), intermediate in the controls (0.21 g) and lower in the *Vachellia* sub-plots (0.18 g). The height growth of cowpea in the first month shows that it is faster under *Balanites* than under *Vachellia* than for the controls. However, the lateral branching of cowpea did not significantly change between the different sub-plots ($p = 0.24$). At harvest, the yields obtained are significantly better ($p = 0.09$) under *Balanites* and lower in the control and intermediate sub-plots under *Vachellia* in an area where agricultural practices are compatible with the use of agroforestry techniques or technologies. .

Keywords : agroforestry, *Balanites aegyptiaca*, *Vachellia senegal*, *Vigna unguiculata*, mycorrhization, MA fungus.

INTRODUCTION

Les zones tropicales semi-arides de l'Afrique de l'Ouest sont caractérisées par une pluviométrie faible et irrégulière, des températures (sol et air) élevées, des sols à faible fertilité, un encroûtement des sols et une faible capacité de rétention en eau (Bationo, *et al.*, 1998). En Afrique subsaharienne, les sols de la plupart des pays ont une faible fertilité intrinsèque et les éléments minéraux exportés ne sont pas remplacés de manière adéquate (Nebhan, 2003). Les systèmes de production actuels sont non soutenables, c'est-à-dire faibles en productivité et destructeurs de l'environnement et pour la plupart, avec un bilan faible en éléments nutritifs (Bationo, *et al.*, 1998). La productivité annuelle de ces terres est ainsi faible spécialement dans les zones où la pluviométrie est inférieure à 400 mm. Le Sahel est la zone de transition entre les zones arides du Sahara au nord et les savanes tropicales subhumides dans le sud, marqué par une pente raide du gradient nord-sud de la moyenne annuelle des précipitations (Le Houerou, 1980). Au Sénégal, le domaine sahélien correspondant à la zone sylvo-pastorale, est caractérisé par une végétation arbustive et arborée dominée par les épineux avec essentiellement des espèces du genre *vachellia*. Ces ligneux jouent un rôle essentiel dans la vie des populations en constituant un fourrage de relais en saison sèche. Mais aussi, c'est une ressource fourragère stable pendant tout le cycle annuel car moins tributaire de la répartition des pluies de la saison précédente comme l'ont souligné Rippsten et Peyre de Fabregues, (1972).

A cela s'ajoute le problème de dégradation cruciale des terres qui résulte surtout de l'utilisation inappropriée de ces dernières principalement par des pratiques culturelles non durables, la déforestation et le surpâturage (Bakhoum, 2012). L'urbanisation, la salinisation des terres et d'autres formes de dégradations de l'environnement ont également un impact négatif sur la disponibilité et la qualité des sols. Une des alternatives les plus récentes qui ont été proposées est l'utilisation des espèces à usages multiples qui sont des espèces agroforestières qui peuvent restaurer la productivité agricole plus rapidement que les jachères naturelles et en même temps qui constituent des produits forestiers tels que le combustible, le bois ((Larwanou, 2012), (Palm & Szotta, 1996), (Harmand & Balle, 2001))

La désertification pose l'un des plus grand défis environnementaux d'aujourd'hui et représente un obstacle majeur à la satisfaction des besoins humains de base dans les zones sèches. Elle ronge inexorablement les terres arables et les ressources naturelles. Elle contribue fortement à l'élargissement et à la multiplication des zones endémiques de pauvreté, d'insécurité

alimentaire et de flux migratoires. En Afrique, des tentatives de revégétalisation sont en expérimentation pour contrecarrer l'avancée inexorable du désert. Née d'une idée de Son Excellence Olusegun OBASANJO, président du Nigéria de 1999 à 2007, l'édification d'un mur de végétation a été conceptualisée par Me Abdoulaye Wade président de la république du Sénégal de 2000 à 2012 sous l'appellation de la Grande Muraille Verte. Ce projet d'envergure continentale porte le choix sur des espèces à large plasticité écologique, à valeur socio-économique, d'importances écologiques et résilientes aux conditions climatiques. Parmi les espèces proposées, *Vachellia senegal* L. Wild. et *Balanites aegyptiaca* Del. répondent à ces critères de choix pour la zone du Ferlo (Bâ , 2012).

Balanites aegyptiaca Del. ou «dattier du désert » fait partie des espèces disposant de caractères adaptatifs au climat sahélien qui permettent leur culture sans recours à l'irrigation, contrairement à la majorité des espèces fruitières cultivées des régions semi-arides (Soloviev, et al., 2004). Dans le Ferlo devenu la cinquième réserve du Sénégal (UNESCO, 2012), c'est l'une des espèces choisies par l'ANGMV pour les reboisements.

Ces deux espèces, adaptées à la sécheresse sont potentiellement intéressantes en agroforesterie au regard de leur apport en matière organique et des relations avec les microorganismes telluriques ((Kull, et al., 2011), (Kaboré-Zoungana, et al., 2008)). Les *Vachellia* sont des légumineuses capables de fixer l'azote atmosphérique et jouent un rôle important dans la gestion de la fertilité des écosystèmes (Matsuoka , 2012).

Par ailleurs, la capacité de certaines espèces ligneuses à s'établir sur des sols pauvres serait en partie liée à leur aptitude à réaliser une symbiose efficace avec des champignons mycorhiziens et/ou des bactéries fixatrices d'azote présents naturellement dans leur rhizosphère (Smith & Read, 2008). Ces processus microbiens peuvent être exploités pour la réhabilitation des sols dégradés avec les techniques d'inoculation microbienne contrôlée (Duponnois, et al., 2007). En plus de leurs effets sur la croissance des plantes, les symbioses microbiennes sont susceptibles de structurer la microflore rhizosphérique qui leur est associée et de ce fait, ont de profondes implications dans le fonctionnement des cycles biogéochimiques du sol. En conséquence, les champignons mycorhiziens et les bactéries fixatrices d'azote sont des composantes essentielles dans le fonctionnement durable des écosystèmes ((Van Der Heijden, et al., 1998), (Hart, et al., 2003), (Dickie & Le Reich , 2005)).

L'objectif général est de contribuer à l'amélioration de la productivité des cultures annuelles dans le Ferlo par la valorisation des communautés microbiennes (champignons MA) associées

aux espèces forestières. Il s'agira spécifiquement de : (i) étudier la perception et les connaissances des habitants de la zone Ranérou sur les pratiques agricoles et leur évolution dans le temps (ii) évaluer le potentiel et les taux de mycorhization du niébé associé à *Balanites aegyptiaca* et *Vachellia senegal* ; (iii) évaluer l'impact de l'arbre sur la croissance et la productivité du niébé.

I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 L'agroforesterie

Au Sénégal, malgré les politiques de relance des productions agricoles, la contribution de l'agriculture dans l'économie nationale est en deçà des espérances. Ceci serait dû en grande partie à la désertification (Ndiaye & Gogo , 2006). De plus, la pression démographique et son corollaire, la recherche de nouvelles terres de culture, ont souvent contribué à la diminution des espaces forestiers entraînant des conflits ouverts entre les différents acteurs du développement rural. Dans ce contexte, l'agroforesterie constitue une alternative viable pour répondre à ces différents défis environnementaux et sociaux.

L'agroforesterie est un système d'utilisation des terres qui combine des arbres et des cultures et/ou bétail au même endroit. L'agroforesterie est de plus en plus reconnue comme une approche utile et prometteuse de la gestion des ressources naturelles qui associe des objectifs de développement agricole durable aux agriculteurs tropicaux démunis en ressources et présente des avantages environnementaux supérieurs à ceux des systèmes agricoles, de pâturages ou de monocultures moins diversifiées (Schroth, et al., 2004). L'agroforesterie permet aussi de diversifier les activités des exploitations avec le bois de rente, les fruitiers et le bois-énergie (ADEME, 2015). La présence d'arbres renforce voire développe la biodiversité en diversifiant les habitats et les ressources alimentaires (Liagre & Dupraz, 2008). Bien qu'étant une pratique ancestrale, l'intégration de l'arbre dans les systèmes de production actuels, doit s'accompagner d'une réflexion sur le long terme (ADEME, 2015). Les associations se réalisent par des techniques dites agroforestières dont on distingue trois catégories structurales : le système agrosylvicol, le système sylvopastoral et le système agrosylvopastoral. En général selon des critères géographiques, climatiques ou même d'objectifs, plusieurs classifications des systèmes peuvent être proposées. Torquebiau (2000) propose une classification simple en cinq catégories sur la base de critères structuraux de disposition dans l'espace ou dans le temps, des composantes de l'association, autrement dit, sur des critères physionomiques faciles à reconnaître :

- **les cultures sous couvert arboré**

À cette première catégorie appartiennent toutes les combinaisons d'arbres et de cultures dans lesquelles la composante arborescente constitue un étage supérieur recouvrant des cultures,

- **les techniques agroforestières en disposition linéaire**

La ligne est une constante de nombreux paysages agricoles et souvent l'arbre vient s'y loger. Ce sont les brise-vent et autres plantations de lisière dont le but est parfois seulement de marquer les limites des parcelles.

- **les agroforêts**

Parcelles à la physionomie typiquement forestière, les agroforêts sont des associations multistrates de plusieurs espèces arborées et saisonnières aux utilisations multiples et complémentaires, parfois nommées « systèmes agroforestiers complexes » (MICHON, et al., 1995),

- **les techniques agroforestières séquentielles**

Cette catégorie regroupe des cas où l'interaction entre arbres et cultures a lieu dans le temps. L'agriculture itinérante, par l'intermédiaire de la friche restructuratrice de la fertilité du sol en est l'archétype.

- **les techniques agroforestières mineures**

Cette dernière catégorie rassemble les cas un peu particuliers où des arbres sont associés à des productions animales spécifiques, à l'instar de certaines pêcheries de mangrove (Torquebiau, et al., 2002).

D'après Nair (1993), l'agroforesterie désigne tous les systèmes d'utilisation du territoire qui associent des arbres ou d'autres végétaux ligneux pérennes et des productions animales ou/et végétales sur la même unité de surface. Cette définition renvoie à une forme d'exploitation et d'optimisation des interactions entre les composantes, notamment entre les ligneux et les autres composantes considérées. Les cultures peuvent être des plantes ligneuses (manguiers, caféier, cacaoyer, etc.) ou des plantes herbacées ou cultures annuelles (sorgho, mil, maïs, niébé et plantes maraîchères, etc.). La composante animale peut être constituée par les animaux domestiques, aquatiques ou même par des insectes. Dans un système agroforestier, les différents composants sont en interaction les uns avec les autres pour assurer une production des terres plus durables et plus diversifier. La complémentarité arbre/culture permet d'accroître la productivité globale de la parcelle : les arbres poussent plus régulièrement et plus rapidement et la culture bénéficie d'un environnement qui, lorsqu'il est bien géré, peut lui être très favorable sur le long terme, et ce, malgré une baisse des rendements dû à la présence de l'arbre (Liagre & Dupraz, 2008). L'agroforesterie a par ailleurs des implications environnementales multiples, grâce aux différents rôles que jouent les arbres dans de nombreux équilibres écologiques (Torquebiau, et al., 2002). Ecologiquement, elle permet un accroissement de l'activité biologique des sols, de meilleures utilisations des sols par le recyclage d'éléments nutritifs, une augmentation de la teneur d'humus, un maintien de la fertilité indispensable pour une

production soutenue, une meilleure occupation de l'espace horizontal, vertical, aérien et souterrain, une protection des variations extrêmes de température, et même une meilleure pénétration des eaux pluviales. Dans certains systèmes agroforestiers, le rendement en produits animaux peut être augmenté d'environ 60 % tout en protégeant le sol de l'érosion (Buck, et al., 1999). Outre les avantages écologiques, l'agroforesterie peut aussi procurer des biens et service socio-économiques. Les arbres apportent des produits divers : bois de feu, fourrages, fruits, bois d'œuvre, bois de services, gommes, résines, tannin... Les ménages ruraux peuvent consommer eux-mêmes les divers produits ou les vendre pour obtenir des revenus monétaires (Le Coënt, et al., 2001). Dans la mesure où des transhumants désirent s'installer de façon durable, des réalisations agroforestières, notamment dans de domaine sylvopastoral, peuvent constituer un premier pas vers la sédentarisation. L'agroforesterie constitue alors pour l'agriculteur la première occasion de devenir véritablement « le propriétaire » de ses arbres. L'importance des parcs agroforestiers pour la durabilité des moyens d'existence, surtout ceux des groupes vulnérables de la société, et en tant que réservoirs de diversité génétique, sont de plus en plus largement reconnus par les décideurs et par le monde de la recherche, d'où un intérêt croissant pour promouvoir leur conservation et améliorer davantage leur gestion afin d'accroître leurs effets positifs pour les communautés rurales (Boffa, 2000).

1.2 Les espèces ligneuses étudiées

1.2.1 *Vachellia senegal* (L.) Wild

1.2.1.1 Caractéristiques botaniques et systématique

Les *Vachellia* appartiennent à un groupe cosmopolite très riche en espèces, les *Mimosoideae* de la famille des *Légumineuses*. D'après Maslin *et al.* (2003), l'histoire systématique du genre *Vachellia* est très complexe. Déjà en 1875, Bentham publie sa version finale de la classification du genre *Vachellia* avec six séries : *Gummifera*, *Vulgares*, *Filicinae*, *Phylodinae*, *Botryocephalae* et *Pulchellae* (Bentham, 1975). Cette répartition était basée essentiellement sur les caractères des feuilles et des stipules. A partir d'études morphologiques et moléculaires, de nouvelles données ont été accumulées et ont permis une meilleure compréhension de la phylogénie des *Vachellia*. De ces études, on déduit une classification en trois sous-genres des *Vachellia* : *Aculeiferum*, *Heterophyllum* et *Vachellia* (Vassal, 1972). Ces travaux sont suivis par ceux de (Pedley, 1978) en gardant la même classification donnée par Vassal. Cependant, il élève les sous-genres au rang de genre en y rajoutant deux autres : *Aculeiferum*, *Heterophyllum*, *Vachellia*, *Senegalia* et *Racosperma*. Ces modifications ont été très peu suivies par les botanistes comme Maslin *et al* (2003) et Murphy, (2008) soutenant la nécessité de poursuivre

les études phylogéniques. Maslin *et al.* (2003) ont établi une autre classification soutenue par plusieurs études phylogéniques comme ceux de (Brown, *et al.*, 2008), Maslin, (2008), (Bouchenak-Khelladi, *et al.*, 2010, Kleinjan & Hoffmann (2013) et Kyalangalilwa *et al.* (2013). Ils démontrent que *Vachellia* Miller est polyphylétique et comprend cinq genres : *Vachellia*, *Vachellia*, *Acaciella*, *Senegalia* et *Marioussousa*.

Selon Vassal (1998), le genre *Vachellia* regroupe 12 espèces qui selon Bentham (1875) appartient à deux séries :

- la série des gummifères qui comprennent des arbres et arbustes non-lianescents et à épines stipulaires plus ou moins développées, dépourvues d'aiguillons.
- La série des vulgares qui sont des arbres, arbustes ou lianes sans épines stipulaires à aiguillons éparses ou infra stipulaires, dans lesquels on retrouve *V. senegal*.

Les *Vachellia* sont des arbres ou arbustes dont la hauteur peut atteindre les 15 m. Chez les jeunes plants, l'écorce est lisse de couleur jaune brun et devient brun rougeâtre ou gris foncé rugueuse et crevassée à l'âge adulte (Ndoye, 2012). Le diamètre varie entre 5 et 20 cm avec des branches épineuses et ascendantes. Les jeunes rameaux sont glabres, assez pubescents portant des feuilles bipennées et alternes. *Vachellia senegal* a des feuilles petites, vertes grisâtre portant 2 à 6 paires de pinnules avec chacune 9 à 15 paires de folioles. Ces dernières oblongues, linéaires et glabres sont longues de 4 à 7 mm et larges de 1 à 1,5 mm (Ndoye, 2012). Ces feuilles sont portées par un pétiole long de 10 à 15 cm avec généralement une glande. Il porte trois aiguillons crochus à l'insertion des feuilles dont l'un est médian et orienté vers le bas et les deux autres latéraux courbés vers le haut (Berhaut, 1975). Les inflorescences pédonculées très odorantes, de couleur blanche sur des épis de 3 à 8 cm, sont insérées par 2 ou 3 ou isolées à l'aisselle des feuilles. Les fleurs blanchâtres ou crèmeuses sont groupées en longs épis (jaunâtres) de 2 à 10 cm (Bakhoun, 2012). La floraison a lieu pendant la saison des pluies. Le fruit est une gousse déhiscante oblongue, droite, atténuée aux deux extrémités aplatie, chartacée, finement réticulée, jaune pâle à maturité. Long de 8 à 10 cm, large d'environ 2 cm, il est surmonté par un pédoncule de 2 à 5 cm (Giffart, 1975)

1.2.1.2 Ecologie

Le genre *Vachellia* occupe une large bande de l'Océan Atlantique à la Mer Rouge. Son aire de répartition se situe entre les parallèles 17° nord et 11° nord (Giffart, 1975). Selon Wikens (1996), 1250 espèces le composent dont la majorité est australienne, avec seulement 134 espèces africaines. Ce nombre est passé à plus de 1350 espèces dont 975 en Australie (Maslin *et al.*, 2003 ; Pedley, 1986). Trois nouvelles espèces ont encore été décrites récemment au Kimberley, en Australie Occidentale (Lewington & Maslin, 2009). *Vachellia senegal* a la plus

large distribution septentrionale de ce genre. Elle a une préférence pour des pluviométries moyennes comprises entre 200 et 600 mm, c'est-à-dire pour le domaine sahélien (secteur sahélo-saharien et sahélo-soudanien). Il affectionne particulièrement les sols sableux profonds (dunes fossiles, sols bruns rouges subarides, sols ferrugineux tropicaux) mais s'observe aussi sur sols limoneux, bruns argileux sous de plus fortes pluviométries pouvant atteindre 800 mm dans le secteur soudano-sahélien (Vassal, 1998).

Écologiquement, *Vachellia senegal* est très plastique. Elle supporte une vaste gamme de températures : les températures moyennes mensuelles variant entre 20 °C en décembre et 35 °C en mai. Elle est résistante au feu et à la sécheresse et peut supporter des températures diurnes très élevées (49 °C) mais pas le gel (Von Maydell , 1990). Sous de fortes précipitations supérieures à 800 mm/an, *V. senegal* tolère des sols argilo-sableux et plus rarement des sols squelettiques. Il peut supporter une assez forte aridité (moyenne 150 mm d'eau) et une pluviométrie élevée atteignant 900 mm d'eau environ sur sols mal drainés *i.e.* argileux (Badji, et al., 1989). *V. senegal*. C'est un arbre typique du Sahel, car son aire de distribution se caractérise par 9 à 11 mois de sécheresse (Chiveu, 2008).

1.2.1.3 Aspects ethnobotaniques

Les *Vachellia* sont des légumineuses appartenant à la famille des *Fabaceas* très appréciés par les populations pour l'alimentation, leurs bienfaits écosystémiques mais aussi socio-économiques très importants. Ils sont très appréciés depuis des siècles pour l'alimentation sous forme de fourrage pour le bétail, la restauration de la fertilité des sols par la fixation de l'azote atmosphérique et les systèmes agroforestiers (Gaafar *et al.*, 2006). Ces familles de légumineuse sont très connues pour leur fort potentiel à capter l'azote atmosphérique qui est transformé en une forme assimilable par les plantes. D'une façon générale, ils constituent tous une source traditionnelle de bois d'œuvre ou de service ainsi que de fourrage aérien. Certaines sont plus connues pour leur production de tanins, de gomme arabique, leurs usages en médecine traditionnelle ou pour leur aptitude à enrichir les sols en azote grâce aux symbioses bactériennes (Vassal, 1998). *Vachellia senegal* Wild est une légumineuse des zones sahéliennes semi-arides. Elle produit une gomme de très bonne qualité qui rentre dans la fabrication de beaucoup de produit alimentaire. Son bois, dur, est très utilisé comme combustible ou bois d'œuvre, dans la menuiserie de même que dans l'artisanat. Ses écorces et fibres sont aussi utilisées dans la pharmacopée sous forme de décoctions contre les affections gastriques et comme plante mellifère (Berhaut, 1975). Cependant, ces plantes excrètent une sève très exploitée : la gomme arabique, qui a une utilisation très convoitée.

1.2.1.4 La gomme arabique

Les espèces du genre *Vachellia* produisent des exsudats sur l'écorce par des blessures volontaires, occasionnelles ou accidentelles. Ses substances de nature polysaccharidique peuvent avoir des usages domestiques, pharmaceutiques, artisanaux, alimentaires, et même commerciaux. Parmi les gommages exsudées par les espèces du genre *Vachellia*, seule la gomme arabique tirée de *Vachellia senegal* est utilisable à des fins alimentaires, les autres ne pouvant qu'avoir des usages industriels (Wikens, 1996). La meilleure gomme est dure, claire, très hydrosoluble, de faible viscosité et à pouvoir rotatoire négatif. A cet égard l'exsudat de *V. senegal* présente les meilleures caractéristiques (viscosité moyenne de 16 ml/g - rotation spécifique voisine de -30") (Vassal, 1998). D'après Perrot, 1944, le gommier ne produit pas de gomme lorsque le sol conserve une certaine fraîcheur, le rôle de la gomme étant de préserver l'arbre d'une évaporation néfaste à sa survie, donc tant que le sujet peut se procurer du liquide grâce à son système racinaire, il n'a pas besoin de protection. L'exsudation résulte d'une dégénérescence cellulaire due à une altération du cambium, du liber, des rayons médullaires parfois même de la moelle (Giffard, 1966). C'est un hydrocolloïde complexe utilisé pour 70 % dans l'industrie alimentaire (boissons aromatiques, confiseries, additifs...), et pour le reste dans les secteurs suivants : pharmacie, adhésifs, impression offset et tissus, fonderie céramique, produits cosmétiques, engrais et explosifs (Mallet *et al.*, 2002).

D'après Mallet *et al.* (2002), les qualités de gomme les plus appréciées sur le marché sont celles du Ferlo (Sénégal) et du Kordofan (Soudan). En effet, le Sénégal faisait partie des principaux producteurs de gomme arabique du monde. Une production de 10 872 tonnes entre 1971 et 1973 (Freudenberger, 1988) le plaça au 3^e rang de producteurs mondial. Cette performance baissa à la suite de la grande sécheresse qui a touché le pays dans les années 1970, d'une surexploitation de la ressource, de la coupe abusive du bois et des besoins fourragères qui pesaient sur l'espèce *Vachellia senegal* entraînant ainsi une dégradation des peuplements.

1.2.2 *Balanite aegyptiaca* (L.) Del.

1.2.2.1 Caractéristiques botaniques et systématiques

La famille des *Zygophyllaceae* compte environs 24 genres avec 240 espèces xérophytes et halophytes (Ronse Decraene *et al.*, 1996). Cette famille appartient à l'ordre des *Zygophylales* du super ordre des *Rosanae*, de la sous-classe des *Magnoliidae*, de la Classe des *Equisetopsida*. Le nom de la famille vient du genre *Zygophyllum* L. Dans la classification APG, la famille des *Zygophyllacées*, placée dans les Fabidées (Eurosids I) n'est pas incluse dans un ordre. *B. aegyptiaca* a trois variétés : *Balanites aegyptiaca* var. *aegyptiaca*, *Balanites aegyptiaca* var.

tomentosa (Mildbr. & Schltr.) Sands et *Balanites aegyptiaca* var. *quarrei* (De Wild.) G.C.C. Gilbert (Sands, 2003). Ce sont des herbacées, éventuellement ligneuses à la base, vivaces ou annuelles (buissons, arbustes et arbres).

Balanites aegyptiaca var. *aegyptiaca* est répandu dans les zones arides. C'est un arbre, partiellement défeuillé durant la saison sèche, à cime sphérique, aplatie ou irrégulière atteignant 8 - 9 m de haut. Le fût est souvent tortueux ; au port remarquable avec ses branches retombantes souples, armées de longues épines alternes ou disposées plus ou moins en spirale. Son écorce est lisse (arbre jeune) devenant crevassée et fissurée, beige à noirâtre, à tranche beige à brun pâle. Les rameaux sont glabres ou presque, verdâtre à beige, plus ou moins lenticellés. Les épines sont droites, disposées à l'aisselle des feuilles, beige verdâtre, atteignant 8 - 10 cm de long. Les feuilles sont alternes, composées bifoliolées, de 1 - 7 cm de long, insérées sous la base des épines. Les folioles sont elliptiques, obovales rhomboïdes, de 2,5 - 6 x 1, 5 - 4 cm, à sommet pointu obtus ou émarginé, à base en coin ou atténuée, à dessous vert-gris mat. Les feuilles disposent de pétioles de 1-4 mm de long avec une nervure pennée, à 5-9 paires de nervures secondaires peu saillantes. L'inflorescence, en petit racème disposé à l'aisselle des feuilles, est composée de fascicules jusqu'à 3 cm de large. La floraison a lieu durant presque toute la saison sèche avec des fleurs jaunes verdâtres sur un pédicelle de 1 cm de long, à 5 pétales et 5 sépales. Le fruit est une drupe ellipsoïde de 5 x 2,5 cm, verte et pubescente, devenant jaune et plus ou moins glabre à maturité. Une peau mince enveloppe une pulpe comestible autour d'un noyau dur, ovoïde et pointu.

1.2.2.2 Ecologie

Encore appelé dattier du désert, *Balanites aegyptiaca* var. *aegyptiaca* se rencontre sur une large zone d'Afrique du littoral de la Mauritanie et du Sénégal à la Somalie, et du sud de l'Egypte à la Zambie et au Zimbabwe, mais aussi dans les régions chaudes du Congo Démocratique et de l'Angola (Brahim, et al., 2016). *Balanites aegyptiaca* var. *aegyptiaca* est largement répandu dans le Ferlo, une région du Sahel sénégalais (Sagna et al., 2014). Elle supporte des précipitations allant de 250 à 1000 mm. *B. aegyptiaca* Del a une grande amplitude écologique : sols sableux, pierreux, argileux, alluviaux, bordures mares, exception faite aux sols hydromorphes ((DAO, 1993) ; Ba, 2012). Elle est peu exigeante vis-à-vis des facteurs édaphiques. C'est ainsi qu'elle fait partie des espèces choisies dans le cadre de la conception de la Grande Muraille Verte.

1.2.2.3 Aspects ethnobotaniques

B. aegyptiaca Del fleurit pendant presque toute l'année (Arbonnier, 2002). Les fruits qui tombent des arbres sous l'effet du vent, les feuilles et les fleurs du *Balanites aegyptiaca* sont

très bien appréciés par les bovins, les ovins, et les caprins même pendant la période de disponibilité de l'herbe (saison pluvieuse) (ZIDA , 2009). L'écorce est utilisée pour soigner les coliques des chevaux et les plaies. Les racines font un bon charbon de même que son bois. Ce dernier est résistant aux insectes et est utilisé pour la construction, sert de manches d'outils, de cure-dent (Arbonnier, 2002). C'est une espèce fruitière, sauvage qui est utilisée dans la pharmacopée et dont l'huile des graines est potentiellement très riche. Le fruit est une pulpe au goût doux et amer qui peut être consommée à l'état frais ou transformée. Dans la zone de Ranérou, le fruit est transformé par les regroupements de femmes en confiture. Cette transformation locale des fruits procure un gain financier non-négligeable.

1.2.3 Le niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]

1.2.3.1 Caractéristiques botaniques et systématiques

Le niébé est une dicotylédone de l'ordre des Fabales, famille des Fabaceae, sous-famille des Faboideae, tribu des Phaseoleae, sous-tribu des Phaseolinae, genre *Vigna* et section Catiang ((Verdcourt , 1970 ; Maréchal *et al.*, 1978) ()). *Vigna* est un genre pantropical comptant plusieurs espèces, dont le nombre varie selon les auteurs: 184 espèces (Phillips, 1951), 170 (Faris, 1965) entre 170 et 150 (Summerfield & Roberts, 1985), 150 (Verdcourt , 1970), 154 (Steele , 1976) et environ 84 (dont une cinquantaine d'espèces indigentes à l'Afrique) (Maréchal *et al.*, 1978 ; Singh *et al.*, 1997).

Vigna unguiculata est une plante herbacée annuelle volubile, à feuilles trifoliolées alternes. Folioles souvent hastées, les latérales un peu falquées, longues de 3 à 10 cm, larges de 2 à 3 cm vers la base et de 10 à 15 mm vers le milieu : base élargie en auricules, sommet en coin obtus. La base est trinervée, 3 à 5 autres nervures latérales sur le sommet de la nervure médiane. Le pétiole est long de 2 à 3 cm avant les folioles latérales ; les pétiolules latéraux sont longs de 2-3 mm et le terminal 10 à 12 mm. La tige, anguleuse ou presque symétrique et légèrement côtelée, peut atteindre 4 m de long. Elle comporte des nœuds qui portent chacun deux stipules caractéristiques de *Vigna unguiculata* et 3 bourgeons axillaires susceptibles de donner une tige latérale ou une inflorescence (DIOP, 2014). Les deux stipules sont ovales appendiculées, le sommet en coin aigu, la base appendiculée plus étroite, aiguë également. Les fleurs sont en glomérule au sommet d'un pédoncule axillaire long de 4 à 5 cm. La corolle est mauve bleuâtre, longue et large de 20 à 22 mm ; la carène est généralement blanche. Le calice urcéolé est long de 5-6 mm, à dents triangulaires de 7 à 10 cm, large de 4-5 mm, contenant une quinzaine de

graines. Les graines sont oblongues rectangulaires, un peu dissymétriques, longues de 4 mm, larges de 2,5 mm et à surface marbrée de gris brunâtre.

1.2.3.2 Conditions écologiques de la culture

Le développement et la productivité du niébé dépend beaucoup des conditions pédoclimatiques telles que la température, la texture du sol, la pluviométrie, les éléments minéraux. Il se comporte bien sous l'ombrage, mais est surtout plus tolérant aux hautes températures (Cissé & Hall, 2003). Le niébé affiche une bonne performance dans les zones agro-écologiques où la pluviométrie est de 500 à 1200 mm/an. Cependant, grâce aux variétés précoces et extra-précoces, il peut pousser dans le Sahel où la pluviométrie est inférieure à 500 mm/an (Dugje *et al.*, 2009). Il s'adapte mieux sur des sols sableux où l'aération permet un développement des racines et par conséquent un bon développement de la plante (Cissé *et al.*, 1996).

1.2.3.3 Aspects ethnobotaniques

Bien que négligé par les décideurs, le niébé (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) joue un rôle non-négligeable dans la sécurité alimentaire au Sénégal. C'est la plus importante légumineuse à graines dans les zones de savane tropicale d'Afrique. Originaire de l'Afrique du Sud-est, il s'est diffusé dans le monde entier. C'est un aliment de base apprécié au Sénégal car ses feuilles, gousses vertes et graines sèches peuvent être consommées et commercialisées (Cissé, 2016). Le niébé est une légumineuse à graines de première importance au Sahel. Cependant, cette culture est marquée par l'instabilité ainsi que la faiblesse de ses rendements, dues essentiellement à la pauvreté des sols en phosphore et en azote (Diouf, 2014). C'est une plante annuelle à port érigé ou rampant. Ses jeunes feuilles ainsi que ses gousses vertes et ses graines constituent une bonne source de protéines, de vitamines et d'éléments minéraux pour l'alimentation humaine et animale (Cissé & Hall, 2003). Les feuilles, les gousses vertes et les graines rentrent dans la préparation de plusieurs plats. Son importance socio-économique justifie le qualificatif « viande de pauvre » qui lui est attribué dans la zone soudano-sahélienne en Afrique occidentale. Malgré les nombreux travaux effectués sur cette espèce, le rendement moyen à l'hectare de la culture du niébé reste relativement instable. Il varie entre 50 à 550 kg/ha en Afrique et est fonction des conditions climatiques, des variétés, des systèmes de culture et du niveau d'utilisation des intrants et des pesticides (Cissé & Hall, 2003). Ces rendements sont jugés faibles comparés aux rendements potentiels pouvant atteindre 1000 kg/ha et 3000 kg/ha respectivement pour les variétés sénégalaises Mélakh et Mouride (Cissé & Hall, 2003). Cette faiblesse des rendements est essentiellement due aux conditions édapho-climatiques. Toutefois, le niébé a l'avantage de former une double symbiose avec les bactéries du genre rhizobium et

les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) du sol. Les champignons mycorhiziens sont des microorganismes omniprésents dans différents écosystèmes terrestres (PERRIN, 1985, Öpik, *et al.*, 2006). Ces microorganismes assurent pour la majorité des plantes terrestres une amélioration des conditions hydrominérales. Le niébé est apte pour des cultures associées avec le mil, il induit un effet positif de la fertilisation sur les thalles, la biomasse et les épis de mil (Mbaye *et al.*, 2014).

1.2.3.4 Culture de niébé en Afrique de l'ouest et au Sénégal

En Afrique de l'Ouest, les principaux producteurs sont : le Nigéria, le Niger, le Mali, le Burkina Faso et le Sénégal (Singh *et al.*, 1997 ; Cissé & Hall, 2003). La culture du niébé occupe une place de choix au Sénégal. Les variétés traditionnelles cultivées au Sénégal enregistrent 93 % des superficies totales emblavées en niébé et ne laissent que 7 % aux variétés améliorées (ISRA, 1998). Les variétés Melakh et Mourid ne représentent que 3,58 % et 0,006 % de la superficie nationale plantée en niébé alors qu'elles sont bien appréciées par les agriculteurs pour leurs cycles de croissance relativement courts, leurs bons rendements et leur utilité alimentaire comme les gousses vertes (Boys *et al.*, 2007). Au Sénégal, les principales zones de culture du niébé sont les régions de Saint-Louis et de Louga au nord avec environ 65 % des surfaces totales tandis que le centre (région de Diourbel et de Thiès) représente la seconde zone de culture avec 29 % des surfaces cultivées (Cissé & Hall, 2003). Le niébé occupe une place très importante dans la société au Sénégal. Dans certains cas, il constitue la seule nourriture disponible pour les familles rurales du Nord du Sénégal pendant la période de soudure (Cissé, 2016). La presque totalité de la culture est consommable : les gousses vertes ou fraîches, les feuilles, de même que la fane. Il peut être cultivé en culture pure ou en association.

1.3 Symbioses mycorhiziennes

1.3.1 Généralités sur les mycorhizes

Le transfert des éléments nutritifs vers les végétaux implique la communauté microbienne du sol. Elle participe aussi dans la fixation biologique de l'azote et joue ainsi un rôle non-négligeable dans l'amélioration des sols pauvres. Ces microorganismes sont essentiellement des bactéries et des champignons. L'azote (N) et le phosphore (P) sont des éléments minéraux essentiels limitant la croissance des plantes dans plusieurs écosystèmes (Chapman *et al.*, 2006). Ces microorganismes, hétérotrophes vis-à-vis de certains éléments nutritifs notamment le carbone, bénéficient d'un apport alloué par les végétaux. A leur tour, ils transfèrent à l'arbre l'eau et les minéraux qu'ils extraient du sol. Cette relation mutualiste est la symbiose. Le mot "symbiose" fut utilisé pour la première fois par l'Allemand Frank (1877) pour qualifier la coexistence d'organismes différents (Béreau, *et al.*, 2003). C'est vers la fin du 19^e siècle

qu'Albert B. Frank introduisit le terme « mycorrhiza » qui signifie littéralement champignon-racine. Parmi les microorganismes du sol produisant des effets directs, les champignons mycorrhizogènes constituent une composante essentielle du système sol-plante (Finlay, 2008). La symbiose mycorrhizienne se définit comme une relation mutualiste étroite et durable entre les racines des plantes et des champignons du sol (Smith & Read, 2008). La mycorhize est un organe particulier, constitué à la fois de la racine de la plante et du champignon. C'est une structure physiologiquement modifiée pour jouer à la fois le rôle de stockage et de transfert de nutriments. Il est actuellement admis que la symbiose mycorrhizienne est une association obligatoire et à bénéfice réciproque entre une racine de plante et un champignon, les avantages pour les deux partenaires devant outrepasser les coûts de fonctionnement (Béreau *et al.*, 2003). Les champignons mycorrhiziens, éléments de la population de microorganismes de la rhizosphère, sont incapables de photosynthèse et sont complètement dépendants, pour les substances carbonées, de la plante qu'ils colonisent (Béreau, *et al.*, 2003), (Plenchette, 2003)). Ils fournissent en retour de l'azote, du phosphore et d'autres substances minérales qu'ils sont capables de mobiliser grâce à leurs connexions hyphales avec le sol (Egli & Brunner, 2002). À l'intérieur de la racine, la plante fournit au champignon des hexoses, à un coût pouvant atteindre 20 % du carbone fixé par la photosynthèse (Smith & Read, 2008). Aussi, la symbiose mycorrhizienne permet aux plantes pionnières de coloniser des sols dégradés généralement carencés en éléments nutritifs tels que le phosphore et l'azote (Duponnois *et al.*, 2007).

1.3.2 Les différents types de mycorhizes

Sept catégories différentes de symbioses mycorrhiziennes ont été distinguées sur la base de leurs caractéristiques morphologiques et des espèces de champignons concernées : les ectomycorhizes, les endomycorhizes à arbuscules, les endomycorhizes à pelotons intracellulaires des *Orchidaceae*, les mycorhizes éricoïdes ou endomycorhizes à pelotons des *Ericaceae*, les mycorhizes à pelotons des *Arbutoides*, les mycorhizes à pelotons des *Monotropoïdes* et les mycorhizes subépidermiques ou ectendomycorhizes (Finlay, 2008 ; Brundrett, 2009 ; Tedersoo *et al.*, 2010).

1.3.2.1 Les ectomycorhizes

Les ectomycorhizes sont plus récentes que les endomycorhizes (environ 250 millions d'années) et font intervenir des champignons Ascomycètes ou Basidiomycètes associés à des espèces végétales ligneuses. Ces champignons ne sont associés qu'avec seulement 3 à 5 % des familles de plantes vasculaires et leur symbiose concerne principalement les dicotylédones (Fortin, *et al.*, 2008). Les champignons ne pénètrent pas les cellules hôtes et la symbiose est caractérisée par la présence d'un manteau ou d'une gaine fongique autour de chaque racine courte. C'est un

réseau de relations intercellulaires d'hyphes pénétrants entre l'épiderme et la cellule corticale, le soi-disant réseau Hartig (Finlay , 2008). Globalement, jusqu'à 10 000 espèces de champignons et 8 000 espèces de plantes peuvent être impliquées (Taylor & Alexander, 2005).

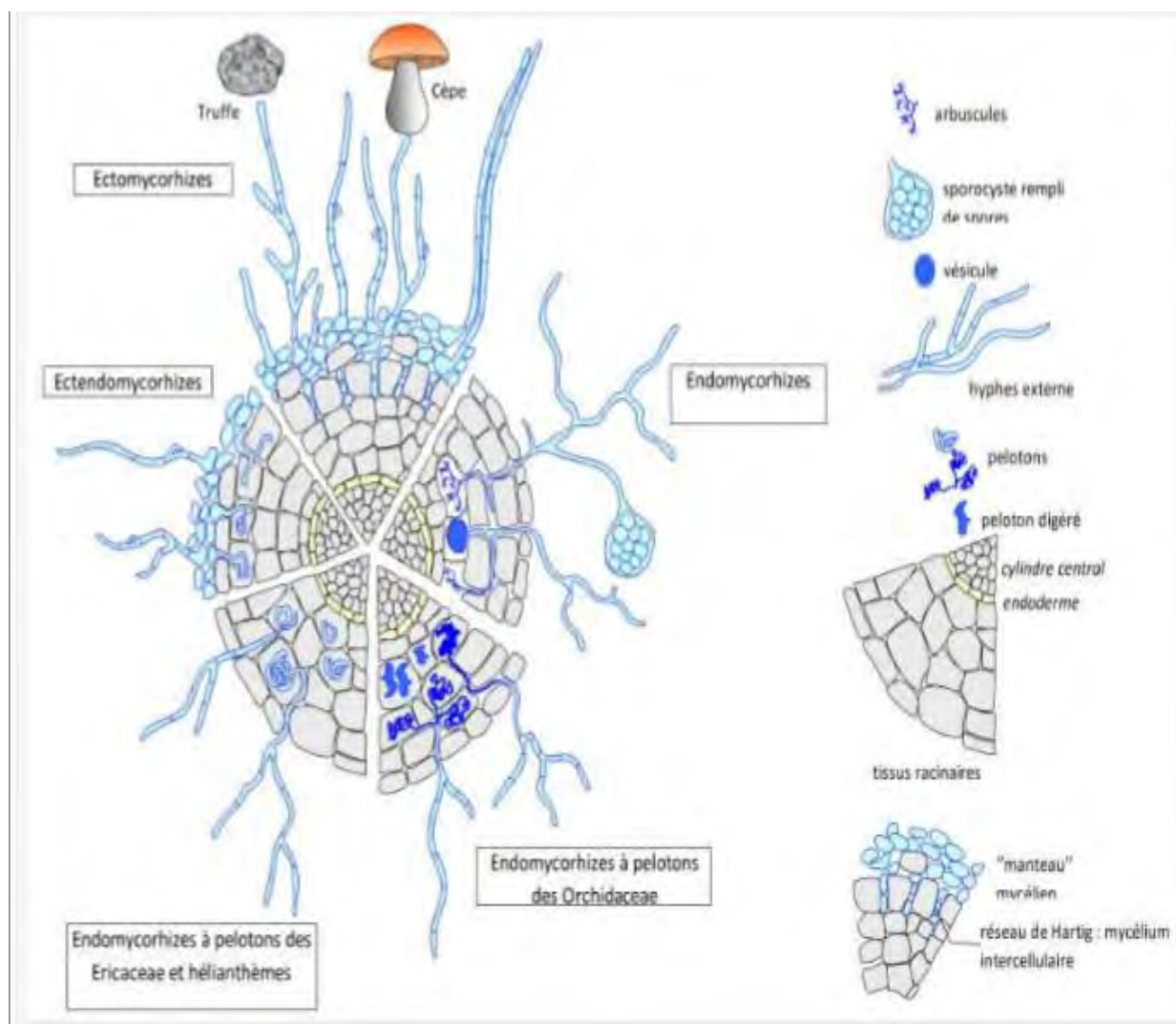


Figure 1: Les différents types de mycorhizes (d'après Halle, 2008)

1.3.2.2 Les ectendomycorrhizes

Ils constituent un groupe de transition, c'est-à-dire que, le champignon est à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de la racine. Les ectendomycorrhizes présentent des caractéristiques à la fois d'ectomycorrhizes avec une gaine qui peut être réduite ou absente, un réseau Hartig généralement bien développé et d'endomycorrhizes avec aussi pénétration intracellulaire (Finlay , 2008). Une fois à l'intérieur de la cellule, les hyphes se ramifient et prennent une forme contournée jusqu'à occuper toute la cellule, mais en repoussant la membrane cellulaire sans la traverser, finissant par être entièrement et étroitement engainés par cette membrane, représentant ainsi une grande surface de contact propice aux échanges symbiotiques (Garbaye, 2013).

1.3.2.3 Les mycorhizes à arbuscules

Les mycorhizes arbusculaires sont les symbioses les plus répandues et impliquent près de 80 % des plantes terrestres (Smith & Read, 2008). *Vachellia senegal* développe des endomycorhizes à arbuscules (Ndiaye *et al.*, 2011).

Les champignons mycorhiziens arbusculaires (MA) appartiennent à l'ordre des Glomales, regroupés dans le phylum Glomeromycota (Schubler *et al.*, 2001). Cette classification des CMA est basée sur des techniques de biologie moléculaire. Auparavant, Morton & Benny (1990) avaient proposé une classification basée sur la morphologie et les caractéristiques des spores, mais aussi sur des caractères phylogéniques. Cette classification regroupe les champignons mycorhiziens dans l'ordre des Glomales (paraphylétique) subdivisé en deux sous-ordres : les *Glomineae* et *Gigasporineae*, avec trois familles et six genres (Morton & Benny, 1990). Cette diversité, proposée par Morton et Benny en 1990 sur l'ordre des Glomales s'est avérée plus étendue grâce à l'outil moléculaire. Sur la base des séquences codant l'ARNr 18S, les champignons mycorhiziens sont regroupés dans un groupe monophylétique : les Glomeromycota avec quatre ordres et neuf familles (Schubler *et al.*, 2001). Ces classifications ont été revisitées par d'autres auteurs dont Parniske (2008), Oehl *et al.* (2011), Krüger *et al.* (2012) et Redecker *et al.* (2013). En somme, Redecker *et al.* (2013) classent les champignons MA dans quatre ordres (*Archeosporales*, *Glomerales*, *Diversisporales* et *Paraglomerales*), 11 familles et 25 genres.

Ce sont des champignons filamenteux coenocytiques qui colonisent à la fois le sol et les racines en établissant un pont entre la rhizosphère et la plante. Pour établir une mycorhize, un CMA doit coloniser le système racinaire d'une plante par son mycélium (Tanguay, 2014). Pour se faire, quand les conditions sont favorables, les spores asexuées germent et forment des hyphes. Sur les racines des plantes, les CMA peuvent présenter différents types de structures dont les hyphes qui sont des filaments intra ou extras racinaires qui ont pour rôle d'infecter les racines des plantes et d'explorer le sol à la recherche de nutriments (Gavériaux, 2012). A partir de ces hyphes, se différencient d'autres structures comme les arbuscules, les vésicules et les spores. En effet pour maintenir une fertilité optimale d'un sol il est nécessaire de déterminer les niveaux souhaitables de propagules MA viables (des spores libres, des spores prises au piège dans des débris, des spores dans les tissus de racine, du mycélium, des fragments de racine) qui s'y trouvent (Kuszala & Gianinazzi, 2010), en estimant son potentiel mycorrhizogène. Le potentiel infectieux mycorrhizogène d'un sol est sa capacité à initier la formation d'associations

mycorhiziennes à partir d'une quantité de propagules présente dans le sol. Ce potentiel peut être évalué par la méthode MPN (« nombre le plus probable » (« Must-Probable-Number »)).

Le mycélium intramatriciel contient des hyphes dont certains se différencient en structures fongiques telles que les arbuscules, sites d'échange entre les deux partenaires et les vésicules, organes de réserves lipidiques du champignon (Strack *et al.*, 2003). Lorsque ces hyphes mycéliens sont en contact avec une jeune racine, ils forment une structure de renflement appelée appressorium (hyphopodium) sur la surface de la racine. C'est le site de pénétration de l'hyphe dans les cellules racinaires (Garbaye, 2013). Les arbuscules sont formés par ramification de l'hyphe dans l'apoplaste de la cellule racinaire formant une invagination du plasma membranaire des cellules corticales. Ce sont les sites d'échanges de nutriments. La vésicule est le lieu de stockage et de réserve des lipides et peut aussi endosser la fonction de propagule (Garbaye, 2013). Les vésicules sont formées chez certaines espèces de champignons et sont présentes dans le périplasme. Les spores sont des structures unicellulaires et multigénomiques, généralement de forme globulaire (40 à 600 µm de diamètre), à paroi épaisse formée de plusieurs couches de différentes textures reliées au réseau filamenteux par un hyphe suspenseur. Les hyphes extraracinaires augmentent le volume de sol accessible à la plante alors que les hyphes intraracinaires se propagent dans les espaces intercellulaires, se gonflent en vésicules selon leur génotype et forment des arbuscules intracellulaires créant une importante zone d'interface entre les cellules des deux partenaires, sites privilégiés d'échanges nutritifs (Dalpé, 2005).

1.3.2.3.1 ETABLISSEMENT DE LA SYMBIOSE MYCORHIZIENNE DE TYPE ARBUSCULAIRE

L'établissement de la symbiose endomycorhizienne débute aussi par un échange de signaux moléculaires entre la plante hôte et son partenaire fongique. En présence de spores, la plante secrète des molécules de signalisation (Garbaye, 2013). Beaucoup d'études ont été faites sur la nature de ces molécules à partir des exsudats racinaires. Elles ont d'abord été considérées comme des flavonoïdes ou des composés analogues (Buee *et al.*, 2000). Akiyama *et al.* (2005) ont isolé des molécules de signalisation qui déclenchent la ramification des hyphes et les ont identifiées comme étant des strigolactones. C'est un groupe de lactones sesquiterpéniques, précédemment isolées comme stimulants de la germination des graines pour les mauvaises herbes parasites comme le *Striga*. Les études effectuées par Besserer *et al.* (2006) ont aussi abouti aux mêmes résultats définissant les strigolactones comme étant des signaux rhizosphériques importants dans la stimulation de la croissance pré-symbiotique des CAM et de la germination des graines des plantes parasites.

En retour, le champignon synthétise et libère dans le milieu des molécules fongiques appelées facteurs Myc par analogie avec les facteurs Nod de la symbiose *Rhizobium*/légumineuses

(Maillet *et al.*, 2011). Ces facteurs Myc sont des lipochitoooligosaccharides, définis grâce à leur capacité à induire des fluctuations du calcium dans les cellules épidermiques de la racine et à activer les gènes de la symbiose avec la plante (Maillet *et al.*, 2011 ; Kosuta *et al.*, 2008).

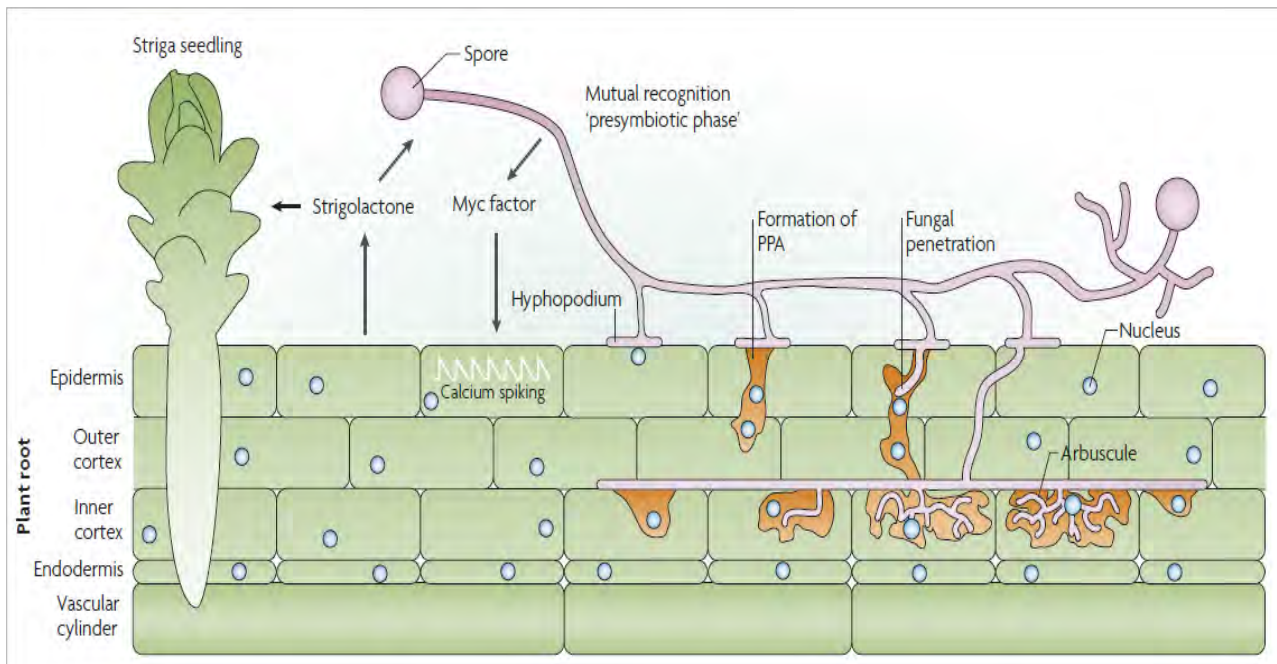


Figure 2 : Etablissement de la symbiose endomycorhizienne (Genre & Bonfante , 2007) modifiée par (Parniske, 2008)

La première phase de la symbiose débute donc par l'activation de la propagule fongique, la recherche de l'hôte, la pénétration dans les cellules de l'hôte et la formation d'organes d'échange. Après formation du tube germinatif (germination de la spore), se développe dans le sol un réseau important d'hyphes mycéliens (Besserer *et al.*, 2006). Au contact de l'hyphe sur une jeune racine, l'appressorium (hyphopodium) se forme. L'hyphopodium adhère à la racine en formant plusieurs protrusions de sa paroi vers la paroi de la racine afin de s'y ancrer. Comme conséquences de ces séquences chimiques et stimulations mécaniques, les cellules épidermiques produisent une structure spécifique et indispensable à l'entrée de l'hyphe dans la racine connue sous le terme *Pre-Penetration Apparatus* (PPA) (Genre *et al.*, 2005). Ce dernier guide l'hyphe jusqu'à la cellule épidermiques qui se prépare à la colonisation du symbiote. Dans l'apoplasme des cellules du cortex racinaires, les hyphes s'étendent rapidement pour former les arbuscules (Parniske, 2004). La pénétration des hyphes dans la racine peut durer quatre à six heures (Genre *et al.*, 2008). L'établissement de la symbiose mycorhizienne se termine par la formation des arbuscules. En plus, les hyphes peuvent sortir de la racine pour former le réseau extramatriciel.

1.3.3 Rôle de la symbiose mycorhizienne à arbuscules

Les champignons mycorhiziens arbusculaires sont ubiquistes et omniprésents parmi un éventail de microorganismes de la rhizosphère du sol. La symbiose mycorhizienne arbusculaire peut procurer une panoplie d'avantages pour les plantes et l'environnement.

1.3.3.1 Nutrition minérale

Les mycorhizes arbusculaires améliorent l'acquisition de nutriments minéraux grâce au mycélium extraradical qui est une extension physique du système racinaire et qui augmente la surface à travers laquelle les nutriments peuvent être absorbés (Finlay, 2008). L'un des éléments les plus importants pour la croissance et le développement des plantes est le phosphore (Smith *et al.*, 2010). Le principal rôle de la mycorhization réside dans le transport des éléments nutritifs peu mobiles tels que le phosphore (Koide, 1991). Cette augmentation de la surface d'échange est réalisée à un faible coût synthétique pour l'hôte. En vertu de leur petit diamètre, les hyphes sont également capables de pénétrer les microsites du sol inaccessibles aux racines des plantes, ces dernières étant trop grossières (Plenchette, *et al.*, 2005). Certains hyphes peuvent se développer à plus de 10 cm de la surface de la racine (Tanguay, 2014). Dans les sols neutres et calcaires, les mycorhizes peuvent modifier l'offre du sol en phosphore par une augmentation de la pCO_2 et une excrétion de protons dans la rhizosphère des plantes mycorhizées (Rigou, 1994). Il en résulte une acidification jusqu'à 1 pH (Li *et al.*, 1991) suffisant pour mettre en solution du phosphate insoluble et par conséquent inaccessible aux plantes non mycorhizées. Ceci permet à la plante d'accéder à un plus grand réservoir de phosphore (Helgason & Fitter, 2005), (Plenchette *et al.*, 2005 ; Smith & Smith, 2012)). En plus de l'absorption du phosphore, les mycorhizes jouent aussi un rôle dans la fixation de l'azote atmosphérique. Les CMA peuvent favoriser l'infection des plantes par les bactéries fixatrices d'azote et la formation de nodules qui permettront à la plante d'accéder à l'azote atmosphérique (Barea *et al.*, 2002). L'absorption d'oligo-éléments par les mycorhizes est aussi améliorée ; c'est l'exemple du Magnésium (Liu *et al.*, 2002), du Zinc (Faber *et al.*, 1990 ; Jamal *et al.*, 2002 ; Chen *et al.*, 2003), du Potassium (Liu *et al.*, 2002), du Fer (Caris *et al.*, 1998) et du Cuivre (Li *et al.*, 1991).

1.3.3.2 Tolérance aux stress

Une meilleure croissance des plantes mycorhizées a été observée dans des conditions de sécheresse (Auge, 2001 ; Aroca *et al.*, 2007), de salinité (Porcel *et al.*, 2012) et sur des milieux pollués par les éléments de traces métalliques (Leyval, 2005 ; Ferrol *et al.*, 2009 ; Aroca *et al.*, 2007), les radioéléments (Leyval, 2005), les fongicides (Campagnac *et al.*, 2010 ; Calonne *et al.*, 2010), et les polluants organiques persistants (Debiane *et al.*, 2008) suggérant ainsi un effet protecteur de la mycorhization contre le stress abiotiques. La tolérance des plantes aux

stress abiotiques, qu'ils soient hydriques, salin ou métallique, dépend de l'efficacité des mécanismes de perception et de transduction des signaux de stress, mais également de l'ampleur des modifications métaboliques induites en réponse (Rodríguez & Redman, 2008). La tolérance des plantes à ces différents stress abiotiques serait attribuée à un ensemble de processus physiologiques dont une meilleure nutrition minérale et hydrique conduisant à un meilleur développement de la plante (Auge, 2001) mais aussi cellulaires (Ruiz-Lozano, 2003). Le déficit hydrique est le facteur le plus important limitant la croissance et la production des plantes, cependant les CMA constitue un outil capable de protéger les plantes hôtes contre les conséquences d'un manque d'eau. Cette protection est rendue possible grâce à un vaste réseau d'hyphes extra-racinaires colonisant un grand volume de sol rendant ainsi la plante plus résistante au déficit hydrique (Hardie, 1985 ; Ruiz-Lozano, 2003). Les champignons mycorhiziens à arbuscules sont parmi la microflore du sol, les constituants les plus importants pour le développement d'une agriculture durable car ils constituent un lien essentiel entre le sol et la plante (Plenchette, 2003)

1.3.3.3 Structure du sol

Outre l'amélioration de la nutrition hydrominérale et la tolérance aux stress, les hyphes extra-racinaires modifient la structure du sol en favorisant l'agrégation des particules. Le réseau mycélien est une structure très dynamique qui contribue physiquement à l'assemblage et au maintien des agrégats du sol, entre autres parce que les hyphes du réseau croissent rapidement et se renouvellent constamment (Hamel & Plenchette, 2007). Ce réseau mycélien contribue à la structure du sol par la croissance des hyphes extraracinaires dans le sol créant ainsi une structure squelettique qui retient les particules du sol entre elles (Tisdall, 1991). Même le mycélium mort participe à l'agrégation des particules du sol par une migration du cytoplasme des hyphes présent dans un site épuisé en nutriments vers de nouveaux hyphes afin de coloniser des sites plus riches (Tanguay, 2014). Le champignon laisse ainsi sur place la paroi externe de son vieux mycélium vidé de son contenu (Tanguay, 2014). Ces structures en forme de tuyaux vides, peuvent permettre le soutien des agrégats et contribuent à la stabilité des sols avant de se décomposer (Hamel & Plenchette, 2007).

L'amélioration de la formation des agrégats peut aussi être due à la sécrétion d'une glycoprotéine, la glomaline, par les hyphes extra-racinaires du champignon (Wright & Upadhyaya, 1998 ; Rillig *et al.*, 2002). Elle rattache et piège les particules du sol en agrégats influençant ainsi sa stabilité (Treseder & Turner, 2007). L'ensemble de ces mécanismes favorise la formation d'agrégats de particules de sol favorisant ainsi une réduction considérable des risques de compaction, une meilleure infiltration des eaux et la fertilité du sol.

1.3.3.4 Résistance aux pathogènes

De nombreux travaux mettent en évidence le rôle des mycorhizes dans la protection des plantes contre les agents pathogènes ((Gavériaux , 2012), (Gamalero, et al., 2004), (Norman & Hooker, 2000), (Dalpé, 2005)). En effet, les mycorhizes synthétisent des antibiotiques, induisent la formation du tanin et favorisent la flore microbienne dans le manteau fongique, ce qui augmente le pouvoir défensif des plantes contre les pathogènes contenus dans le sol (Egli & Brunner, 2002). Cette atténuation des attaques des pathogènes peut se faire par une modification de la structure racinaire (Finlay, 2008) ou une augmentation du taux de phénol (Raman *et al.*, 2001). D'autres mécanismes indirects peuvent impliquer l'amélioration de la nutrition de la plante, la transformation de la morphologie végétale, la modification de la microflore et de la composition des sols. D'autres actions plus directes impliquent la stimulation de mécanismes de défense par la plante et la compétition entre les mycorhizes et les parasites pour l'espace, les sites d'infection et les éléments nutritifs. Il a été démontré que l'infection de la racine de la plante hôte par le champignon mycorhizien préconditionne la plante à faire face aux attaques pathogènes (Tanguay, 2014). Cette réduction de la susceptibilité aux infections n'est généralement efficace que lorsqu'une symbiose fonctionnelle s'établit préalablement à l'attaque du parasite, car dans la majorité des cas, ces derniers, une fois en contact avec leur hôte, envahissent nettement plus rapidement les tissus végétaux que les champignons mycorhiziens (Dalpé, 2005). Par ailleurs, il a aussi été démontré que certains champignons mycorhiziens, comme *Glomus irregulare*, peuvent contrôler la croissance des champignons pathogènes et réduire leur production de mycotoxines (Ismail *et al.*, 2013).

Il est à noter aussi que le pouvoir protecteur contre les pathogènes a ses limites et dépend de plusieurs facteurs comme la plante, le champignon mycorhizien et la virulence du pathogène (PERRIN, 1985). Les conditions environnementaux (sol, température, humidité, etc.) influencent aussi la capacité du mycorhize à protéger la plante hôte contre les pathogènes (Dalpé, 2006).

II. MATERIEL ET METHODES

II.1 Présentation de la zone d'étude

II.1.1 Caractéristiques Bioclimatiques

Au Sahel et en particulier au Ferlo, depuis plusieurs décennies, les actions combinées de la péjoration climatique et de l'anthropisation font subir à la végétation une forte dégradation. Le Ferlo est une zone sylvo-pastorale semi-désertique au nord-est du Sénégal, principalement constituée de savanes arbustives à arborées très ouvertes et périodiquement soumise à des feux (Ngom, 2008). La végétation du Ferlo était constituée par une savane soudanienne fortement boisée où poussaient des espèces vivaces jusque dans les années 1970 (Barral, 1983). La sécheresse qui a touché le pays dans les années 1970-1974 a fortement marqué cette végétation. La caractérisation du peuplement ligneux de la Réserve de Biosphère du Ferlo montre par une analyse des fréquences centésimales que cette flore est constituée de 29 espèces et *Vachellia senegal* est la 11^e avec 18 % de fréquence (Ngom *et al.*, 2013). Au Sénégal, le Ferlo a toujours un rôle déterminant dans la mobilité des troupeaux à la recherche de pâturages. La transhumance est une stratégie de sécurisation adaptée aux changements climatiques (Leclerc & Sy, 2011). Cependant, tout au long de la vallée du Ferlo et ces affluents, les habitants ne transhumant pas en saison sèche hors de la zone, ils optent pour des mouvements d'Est en Ouest de la haute vers la basse de la vallée et vice-versa. (Sy, 2010).

Sur la série climatique de 40 ans (1980-2019) de la zone d'étude, on peut distinguer deux périodes pluviométriques. D'abord on note des années sèches de 1980 à 1998. Ensuite il s'en est suivi un retour à des années plus pluvieuses à partir de 1999 avec 535,1 mm marquées notamment par quelques années sèches. La moyenne de la série de 376,98 mm, elle nous permet de considérer l'année d'étude (2018) comme étant une année sèche avec une moyenne pluviométrique de 305,2 mm. De cette série, c'est en l'an 2000 que la quantité de pluie la plus importante a été enregistrée avec une moyenne de 717 mm.

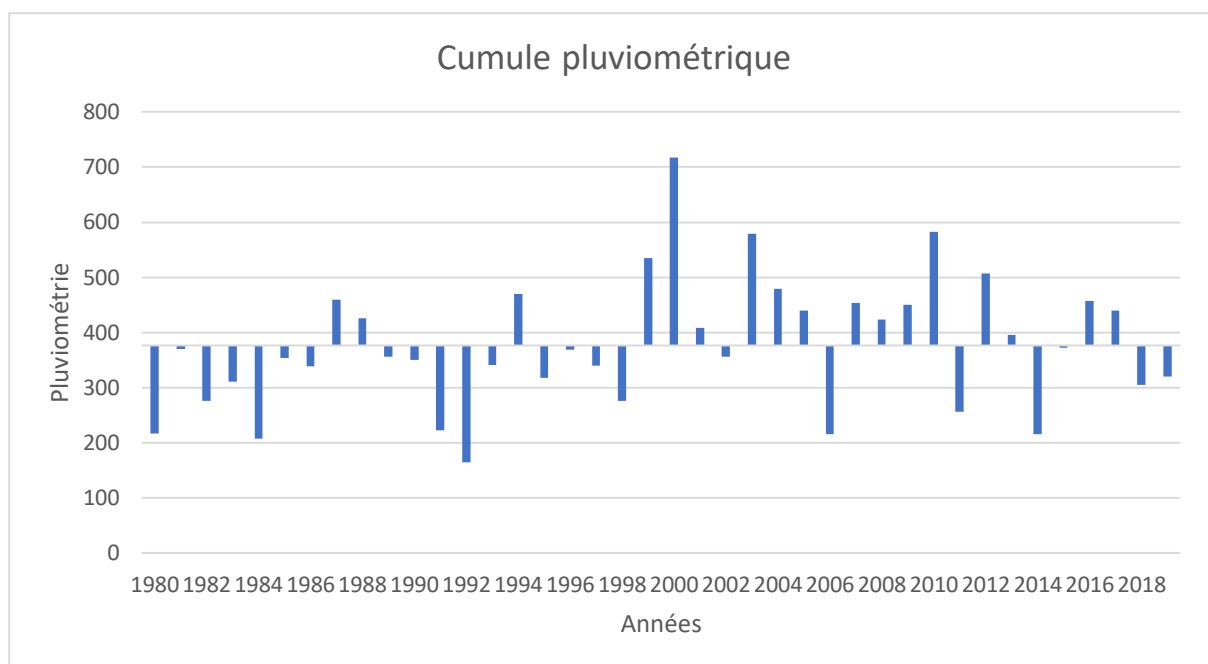


Figure 3 : Variabilité pluviométrique inter-annuelle de la période 1980 à 2019 de la région de Matam (ANACIM, 2019)

Le diagramme ombrothermique de cette année nous montre la répartition des mois pluvieux de cette période. De ce diagramme se dégage une saison sèche de Novembre à Mai et une saison pluvieuse de Juin à Octobre. La comparaison de ces deux saisons montre que la période pluvieuse est de plus courte durée et est marquée par un pic au mois d’Août où on enregistre les quantités de pluies les plus importantes. La température moyenne annuelle est de 31° C avec une maximale de 38°C et une minimale de 28°C.

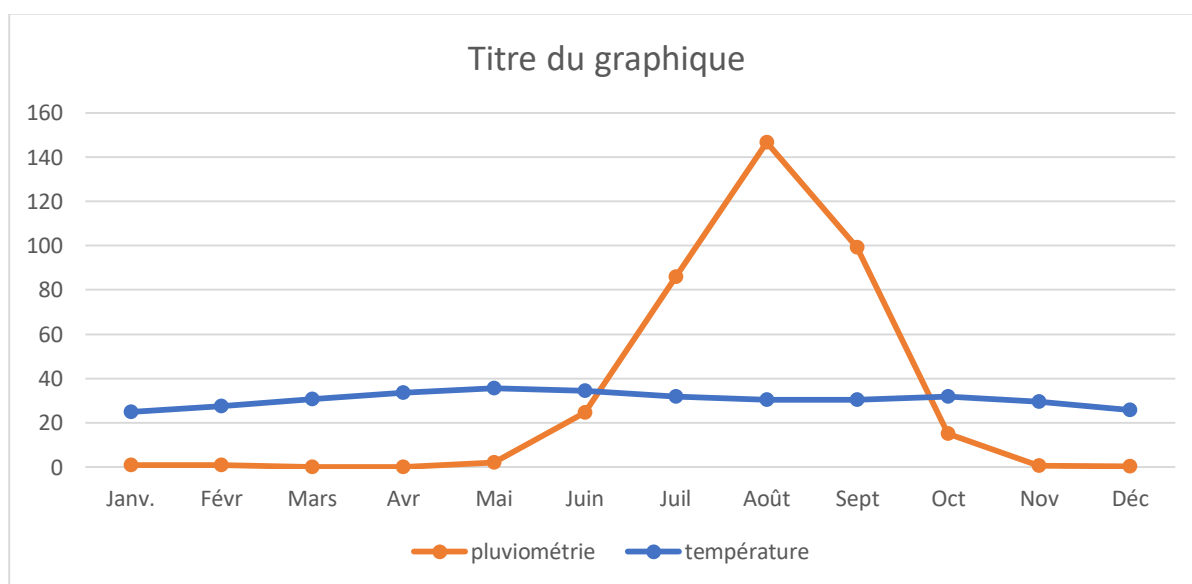


Figure 4 : Diagramme ombrothermique de la région de Matam de 1980 à 2019

L'humidité relative moyenne de ces 40 dernières années est de 43% avec une maximale de 58% et une minimale de 28%. L'air de la région est plus sec durant les mois de Janvier à Mai et devient de plus en humide à partir de Juin.

II.1.2 La Grande Muraille Verte

La forte perturbation des grands équilibres écologiques liée en grande partie aux changements climatiques et à la désertification qui a touché les pays de la zone sahélo-saharienne du Circum-Sahara a été à l'origine de divers programmes-cadres et plans d'action pour lutter contre ces menaces. Nombreux ont été les programmes proposés par les pays de la zone sahélienne en marge du Sahara depuis la signature de la Convention internationale de lutte contre la désertification à Paris en octobre 1994. La Grande Muraille Verte (GMV) est l'initiative phare du continent africain pour combattre la désertification et les effets du changement climatique et lutter contre l'insécurité alimentaire et la pauvreté. L'initiative a été adoptée en 2007 par 11 pays lors de la conférence des chefs d'Etats de l'Union Africaine tenue à Addis-Abeba (Éthiopie). L'objectif majeur du programme est de contribuer à la lutte contre l'avancée de la désertification et à la mise en valeur des zones saharo-sahéliennes par une restauration et une gestion durable des ressources naturelles et une lutte contre la pauvreté (Dia & Niang, 2012). La GMV est conçue comme un long couloir de 15 km de large traversant tout le continent africain sur 7 800 km en passant par 11 pays. Cette muraille doit relier Dakar (Sénégal) à Djibouti (Djibouti); cela représentera environ 117 000 km² ou 11,7 millions d'hectares. Le tracé de ce mur d'arbres, serpentant entre les parallèles 15° et 10° Nord, à peu près à mi-distance entre l'équateur et le tropique du Cancer, s'étend sur des versants arides ou semi-arides du Sahel, recoupe les bas-fonds de petites rivières souvent endoréiques et croise les plaines alluviales et les lits des grands fleuves ou de leurs principaux affluents (Albergel & Diop, 2012). La GMV ne doit pas être vue comme un mur d'arbre, l'idée a inspiré l'initiative à laisser place à une mosaïque de pratiques durables d'utilisation des terres. Il s'agit de l'édification d'un ensemble de zones de reboisement traversant à terme tout le continent africain d'Est en Ouest (Guissé *et al.*, 2013).



Figure 5: Tracé de la GMV en Afrique (Anon., 2017)

C'est une bande végétale avec une attention particulière aux espèces indigènes. La flore et la végétation sont les premiers facteurs structurants pour la restauration de l'environnement. La Grande Muraille Verte est une initiative très importante avec des impacts et retombées positifs parce qu'elle devrait contribuer à : limiter la désertification ; séquestrer le carbone ; restaurer l'environnement dans des zones presque désertiques ; créer un cadre de vie propice au développement d'activités génératrices de revenus, mais aussi de bien-être économique et social. (Ba, 2012). Au Sénégal, ce tracé s'étend sur 545 km depuis la côte Ouest de la région de Louga, passant par les régions de Matam, et Tambacounda jusqu'à la frontière avec la République du Mali (figure 4). La zone choisie correspond à celle dominée principalement par les activités pastorales avec un élevage extensif et des activités agricoles, soit une superficie d'environ 817 500 ha (Cisse & Sarr, 2012). Sa mise en œuvre est menée selon une approche intégrée et participative, mais aussi visant à mettre en synergie des actions d'atténuation des effets de la désertification avec celles de mise en valeur des potentialités que renferment les zones en question.

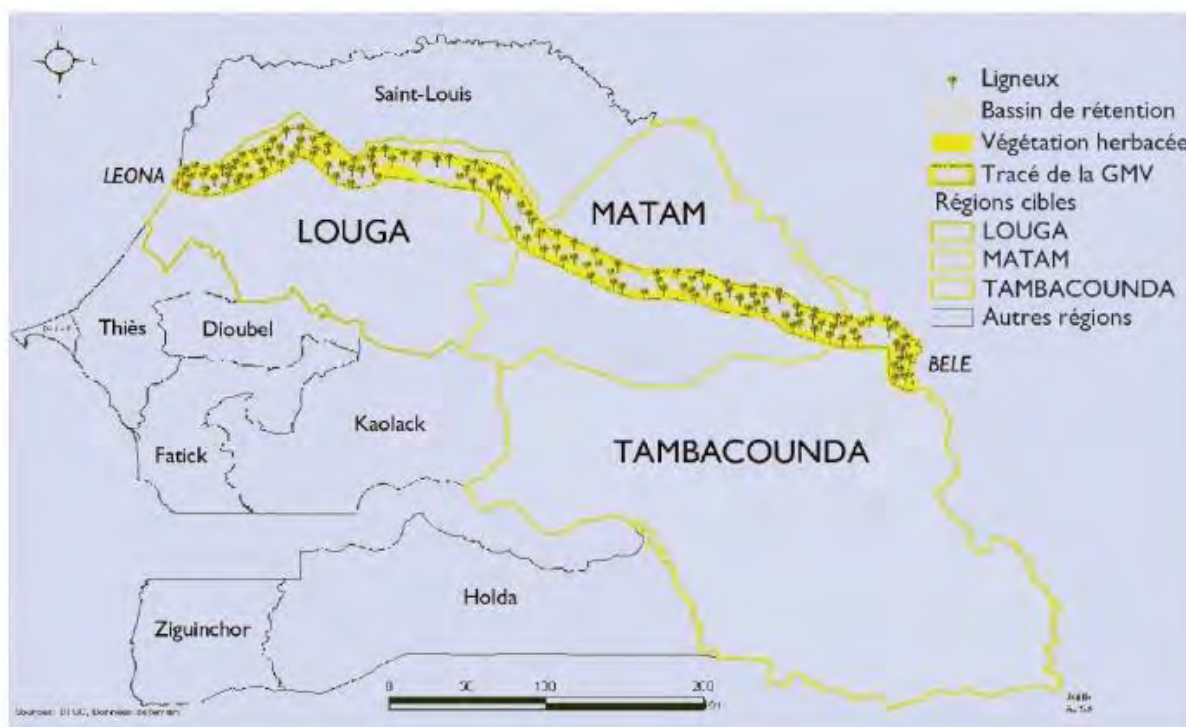


Figure 6: Tracé de la Grande Muraille Verte au Sénégal (Cisse & Sarr, 2012)

II.1.3 Le site d'étude

Les expérimentations au champ ont été réalisées à Ranérou (région de Matam) dans une parcelle expérimentale de l'UMI CNRS Environnement, Santé, Sociétés. Cette parcelle clôturée existe depuis 2016 et est équipée d'une station météo (suivi de température/humidité relative/pluviométrie) afin de relier les données obtenues avec des données climatiques. Ce site dispose d'un peuplement naturel d'espèces ligneuses et d'une plantation de treize autres espèces.

II.1.4 Enquêtes sur la perception de l'agriculture dans le Ferlo

En collaboration avec un sociologue et un spécialiste de la résilience, un questionnaire a été établi. Ce dernier comporte seize grandes questions qui passent en revue les différentes informations souhaitées chez le paysan et sur la pratique de l'agriculture elle-même. Les enquêtes socio-économiques ont été réalisées dans vingt et un (21) villages des communes de Ranérou et Kanel. Soixante-quinze (75) personnes ont été enquêtées dans vingt et un (21) villages aux alentours de Ranérou centre dans la période du 10 juillet au 18 octobre 2018 avec l'appui de traducteurs en langue poular préparés pour la tâche. Ces villages font toutes parties des communes de Ranérou et Kanel. Ils ont été identifiés avec l'appui d'un sociologue et de l'agent de l'ANCAR de la zone.

II.1.5 Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est constitué de semences de la variété de niébé Mélakh, sélectionnée par l'ISRA de Bambey. Elle est adaptée aux faibles pluviométries et est à cycle court (environ 90 jours). Les rendements standards sont à l'ordre de 1t/ha. D'après le service départemental de l'agriculture de Ranérou, les rendements sont estimés entre 350 à 500 kg/ha.

Cette présente étude vise à rechercher l'effet de deux espèces ligneuses que sont *Balanites aegyptiaca* et *Vachellia senegal* sur le niébé et les champignons à mycorhizes arbusculaires présent dans le sol. Ces deux espèces ligneuses appartiennent à un peuplement naturel. Leur choix repose sur l'âge approximatif et la distance par rapport aux arbres voisins. Ils doivent être suffisamment isolés pour minimiser toute influence d'un arbre voisin.



Photo 1: semence de niébé de la variété Mélakh

II.1.6 Dispositif expérimental

Le dispositif est constitué de carrés de 7,2 m de côté. Pour la culture, huit parcelles élémentaires de 51,84 m² (7,2 m / 7,2 m) ont été délimitées chacune autour d'un arbre (*Vachellia senegal*) et huit autres parcelles élémentaires de même dimension autour de

Balanites aegyptiaca. Huit parcelles témoins ont aussi été installées en hors couvert (HC). Sois un total de 24 parcelles élémentaires. Le semis a été réalisé avec des écartements de 60 cm entre les lignes et 60 cm sur les lignes. Sous couvert, les poquets démarrent à partir de 60 cm de l'arbre.

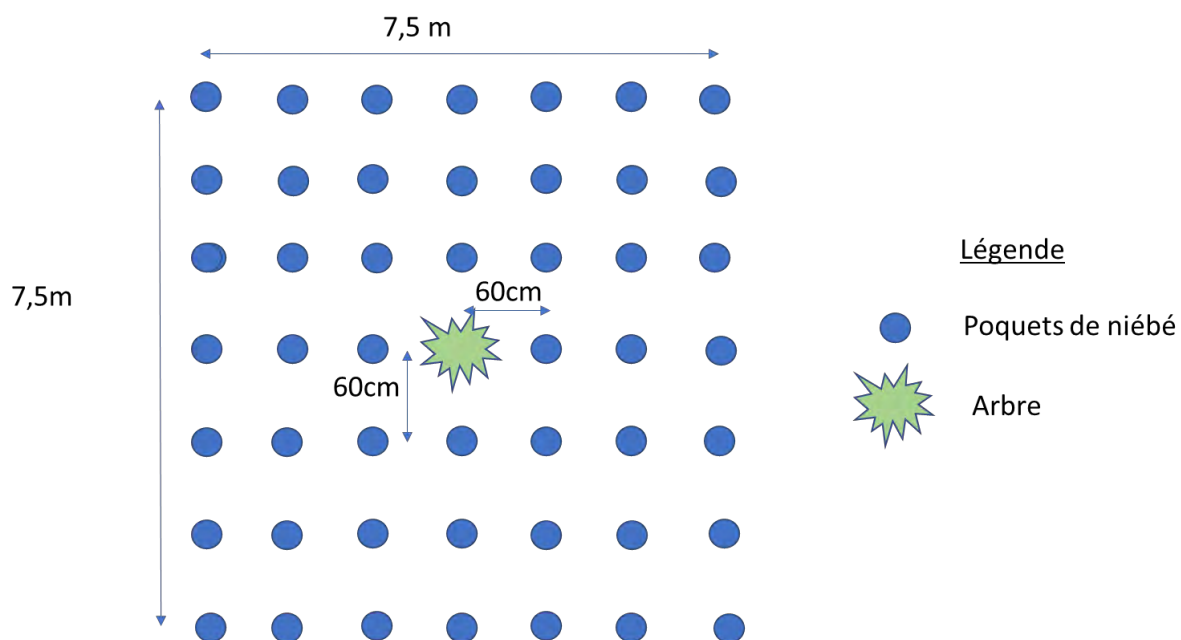


Figure 7: Parcelle élémentaire de culture du niébé sous couvert



Photo 2: culture de niébé sous *Balanites aegyptiaca*

II.1.7 Conduite de la culture

L'expérimentation a été réalisée pendant la saison des pluies de 2018. Les plants ont été semés le 23 juillet et démarrés à un plant par poquet à 20 jours après. Les parcelles ont été maintenues propres grâce à un désherbage régulier. Aucune fertilisation n'a été effectuée et les parcelles n'ont reçu aucun traitement chimique (pesticide ou fongicide).

II.1.8 Paramètres mesurés

II.1.8.1 Hauteur et ramification des plants de niébé

Tous les dix (10 JAS), la hauteur des plants de niébé a été mesurée avec une règle graduée. Au bout des 30 jas, c'est le nombre de tiges latérales émises qui est compté pour la suivie de croissance. Les mesures sont faites sur les plants situés respectivement à 1,20 m, 2,40 m et 3,60 m de l'arbre et dans chacune des quatre directions (Est, Ouest, Nord et Sud). Ainsi, 12 plants ont été mesurés pour chaque parcelle sous couvert, soit un total de 96 plants sous *Balanites aegyptiaca* et 96 plants sous couvert *Vachellia senegal*. Dans les parcelles HC, quatre plants sont choisis au hasard et fixés pour chaque parcelle pour la prise de mesure soit un total de 16 plants en hors couvert.



Photo 3: Mesure de la hauteur du Niébé

II.1.8.2 Biomasse aérienne et racinaire

Trente jours après semis, 192 plants de niébé ont été arrachés suivant les quatre directions autour de l'arbre à 1,2 m, 2,4 m et 3,6 m. Sur les parcelles témoins 32 plants ont aussi été prélevés. L'extraction s'est faite en essayant de prendre le maximum de racines possible. Ces plants ont été séchés à l'ombre et conservés au sec. Les parties aériennes (tiges et feuilles) et

souterraines (racines) de ces échantillons secs sont pesées avec une balance de précision pour estimer la biomasse.

II.1.8.3 Taux de mycorhization et MPN

ECHANTILLONNAGE DE SOL ET DE RACINES

Sous chaque arbre, un échantillonnage de sols a été prélevé avant le semis de la culture à une profondeur entre 10 et 30 cm, zone de prédilection des microorganismes telluriques et dans les quatre directions autour de l'arbre à 1/3 et 2/3, du diamètre du houppier. La même opération a été réalisée après la récolte. Ces prélèvements, effectués avec une tarière, sont ensuite mis dans des sachets en plastique et conservés à l'abri de l'humidité. Après estimation de la biomasse racinaire du niébé, les racines prélevées sont ensuite utilisées pour calculer le taux de mycorhization.

II.1.8.3.1 COLORATION DE RACINES

Les racines prélevées préalablement et conservées au sec, sont colorées selon la méthode de Philips et Hayman (1970). Ces échantillons ont été soigneusement rincés à l'eau de robinet afin d'éliminer les particules de sol puis placés dans des tubes à essai. Pour vider le contenu cytoplasmique et décolorer les racines, elles sont mises dans une solution de KOH et les tubes sont placés au bain-marie à 90° pendant une heure. Après rinçage des racines à l'eau de robinet pour éliminer le KOH, elles sont plongées dans une autre solution de HCl 10 % pendant 30mn à la température ambiante. Le HCl permet de mieux fixer le bleu sur les cellules fongiques. Les racines ont ensuite été colorées avec une solution de 0,5 % de bleu de méthylène. Pour préparer 1000 ml de cette solution, Il faut 200 ml de HCl 10 %, 200 ml de vinaigre, 50 ml de glycérol, 550 ml d'eau distillée et 0,5 g de la poudre de bleu de méthyl.

Les tubes sont à nouveau placés au bain-marie à 80 °C pendant 30mn. Au terme de la coloration, les racines sont légèrement rincées puis conservées dans de l'eau. Cette méthode de mise en évidence permet de colorer en bleu foncé les propagules des champignons (vésicules, hyphes et arbuscules) alors que les cellules de la racine vidées de leurs contenus restent incolores. Après refroidissement, le contenu des tubes est vidé et les racines sont mises dans des boîtes de Pétri contenant de l'eau pour le prélèvement des fragments à observer.

II.1.8.3.2 OBSERVATION DES RACINES AU MICROSCOPE ET ESTIMATION DES FREQUENCES ET DES INTENSITES DE LA MYCORHIZATION

Des fragments de racines d'environ 1 cm sont placés entre lames et lamelles, écrasés dans une goutte de glycérol pour une meilleure adhésion. Le glycérol permet aussi de garder les fragments hydratés pour la conservation. L'écrasement permet de mieux étaler les racines afin

que les cellules soient plus visibles et le glycérol évite aussi la brisure de la lamelle. Sur chaque lame, 15 fragments ont été placés. Pour déterminer la colonisation mycorhizienne, les fragments ont été observés au grossissement *40.

Par la méthode de Trouvelot et al. (1985), l'estimation de la colonisation des racines par les champignons a été réalisée. En effet cette méthode qui établit un système de notation afin d'estimer la proportion de cortex racinaire colonisée par les champignons MA est basée sur 6 classes. Le schéma ci-dessous décrit les différentes classes proposées.

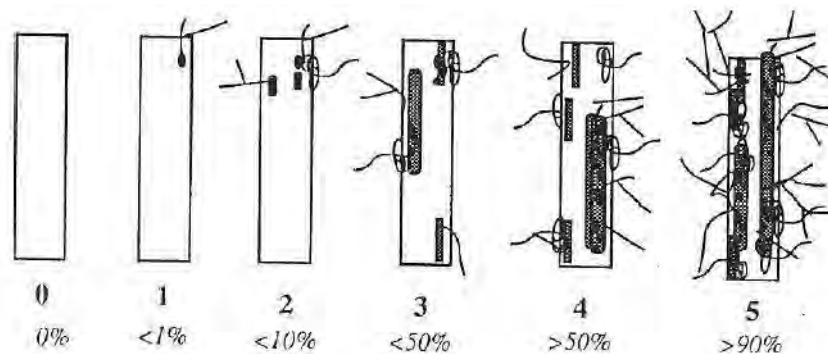


Figure 8: Systèmes de notation des taux de mycorhization des fragments

Après observation microscopique, la fréquence et l'intensité de mycorhization sont calculées par les formules suivantes :

$$I\% = (95n_5 + 70n_4 + 30n_3 + 5n_2 + n_1) / \text{nombre total de fragments observés}$$

$$F\% = (\text{nombre de fragments mycorhizés} / \text{nombre total de fragments observés}) \times 100$$

Avec n_1 , n_2 , n_3 , n_4 et n_5 le nombre de fragments noté respectivement de 1 à 5.

I= intensité de mycorhization

F= fréquence de mycorhization

II.1.8.3.3 ESTIMATION DU POTENTIEL INFECTIEUX MYCORHIZOGENE DES SOLS

L'estimation de ce potentiel se fait sur une technique basée sur la dilution des sols. Cette méthode de dilution vise à déterminer par un test biologique, le nombre le plus probable de propagules fongiques sans faire de distinction entre elles. Elle permet d'estimer sans comptage direct le nombre de propagules fongiques d'un milieu. Cette méthode est basée sur la présence (+) et l'absence (-) de signe de mycorhization (hyphes, arbuscules, vésicule, ect) sur les racines de plantes tests. Une plante mycotrophe (*Zea mays* L.) est cultivée sur un sol à tester dilué avec le même sol stérilisé.

Les prélèvements de sol prélevés sur chaque parcelle élémentaire sont mélangés afin d'obtenir un échantillon composite pour chaque espèce ligneuse (*V. senegal* et *B. aegyptiaca*). Ainsi, 10 échantillons ont été obtenus dont quatre sous les Vachellia, quatre sous les Balanites et deux en hors couvert. Parmi ces ceux-ci, cinq sont prélevés avant semis et cinq autres après récolte. A noter que sous couvert, il y a un prélèvement à 1/3 et un autre à 2/3 du houppier à partir du pied de l'arbre. Pour chaque échantillon, 3000g de sol a été stérilisé à l'autoclave 120° pendant 2 h.

La dilution se fait en mélangeant du sol stérile et naturel suivant les proportions 1, 1/4, 1/16, 1/64, 1/256 et 1/1024 nommées respectivement D₁, D₂, D₃, D₄, D₅ et D₆. Pour chaque dilution, quatre pots en plastique sont remplis de 100 g de sol et placés en serre pour la culture du maïs.

Tableau 1: Fractions de dilution des sols pour le MPN

Dilutions	Quantité de sol naturel (g)	Quantité de sol stérile (g)
D ₁	100	0
D ₂	25	75
D ₃	6,25	93,75
D ₄	1,56	98,44
D ₅	0,39	99,61
D ₆	0,1	99,9

Les semences de maïs ont été conservées dans l'eau tiède pendant une demi-journée avant d'être semées dans les pots contenant les gammes de dilutions de sol en serre. Pendant 45 jrs, la culture est entretenue en arrosant à la capacité au champ toutes les 24 h.



Photo 4 : Pots avec du maïs semé en serre sur les gammes de dilutions de sol

Après 45 jrs de culture, les plants de maïs sont récoltés. Les racines sont coupées et colorées suivant la méthode de Philips et Hayman (1970) modifiée. Les racines colorées sont ensuite observées au microscope au grossissement *40.

Les fragments mycorhizés sont notés (+) et les racines non mycorhizées (-). Le MPN est déterminé selon la méthode décrite par Sieverding (1991) et avec les tables de Fischer et Yates (1948) avec la formule :

$$\text{Log } MPN = (x \log a) - K$$

x est la moyenne des plantes mycorhizées soit le total pour toutes les dilutions divisé par 5 (nombre de répétitions).

a est le facteur de dilution soit 4 dans le cas présent.

$y = s - x$; **y** est requis pour trouver le nombre **K**.

s est le nombre de dilutions soit ici 6.

K est donné dans la table de Fischer & Yates (1948 ; 1970).

II.1.8.3.4 ANALYSES DES DONNEES

L'ensemble des résultats obtenus ont été traité avec les logiciels: R pour les analyses statistiques, Excel pour la construction de graphiques et le calcul du taux de mycorhization ainsi que du MPN et SPSS pour le traitement des informations issues des enquêtes

III. RESULTATS

III.1 Savoir-faire et perceptions sur les pratiques agricoles dans le Ferlo : le cas de la culture du niébé

III.1.1 La production de niébé

Les principales spéculations rencontrées dans le Ferlo (zone sylvo-pastorale), sont la souna (*Pennisetum glaucum*), le bassi (*Sorghum bicolor* (L) Moench), le maïs (*Zea mays* L.), l'oseille (*Hibiscus sabdariffa* L.), le niébé (*Vigna unguiculata* L.), la pastèque (*Cucumis melo* L.) et le gombo (*Abelmoschus esculentus* L.). Le mil et le maïs sont les deux cultures les plus importantes. La culture du niébé est essentiellement sous-pluviale, en association ou en dérobée (fin du cycle d'une culture principale). D'après un recensement des informations sur les pratiques culturelles dans une partie de cette région, (Ranérou centre et ces villages environnants), 26,67 % de l'échantillon ont recours à cette forme de culture. Ces productions sont destinées pour la plus grande partie à l'autoconsommation. Les usages culturels et traditionnels (naissances, mariages, deuils, circoncisions, cérémonies religieuses et traditionnels, etc.) sont aussi satisfaits avec les récoltes.

III.1.2 Utilisation des intrants

Dans la zone de Ranérou, la fertilisation des sols se fait essentiellement à travers la déposition de déjections par les bovins (bouses) se trouvant dans le système. Le diagramme suivant (figure 7) montre l'utilisation et la nature des fertilisants. Ces résultats révèlent une fertilisation majoritairement animale. La plupart des campements disposent d'un troupeau de bovins, de caprins et/ou d'ovins. Durant la saison sèche ces troupeaux séjournent dans les champs pour brouter l'herbe ou le reste des résidus des récoltes. Les transhumants peuvent aussi durant leur passage laisser leur troupeau brouter sur les terres arables. Les campements ne disposant pas de bétail récupèrent les composés organiques chez leurs voisins pour les épandre dans leurs champs ou prêtent leurs champs à un transhumant. L'engrais chimique n'étant pas accessible financièrement, il n'est utilisé que par une faible portion de la population pratiquant le maraîchage.

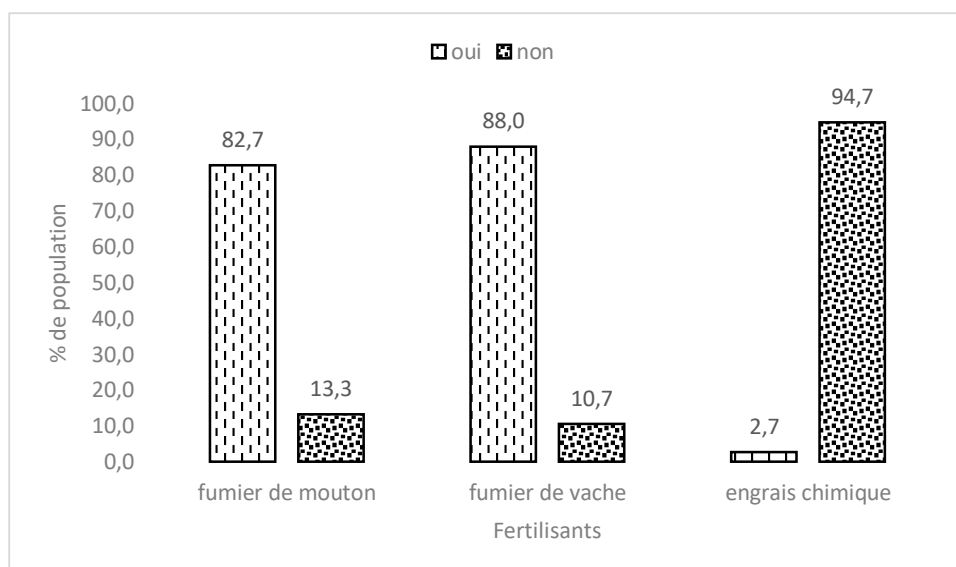


Figure 9:utilisation des fertilisants dans les champs

III.1.3 Gestion des résidus de récoltes

A la récolte, les parties aériennes des cultures non récoltées et laissées sur le sol dans les champs constituent les résidus. Il s'agit des tiges, des chaumes, des feuilles, de la paille et des gousses par exemple. Ils représentent une quantité importante de matières organiques qui peuvent être valorisées de différentes manières. La valorisation de ces résidus peut revêtir différents aspects. La répartition de l'usage des résidus est décrite dans les diagrammes suivant où trouve cinq utilisations.

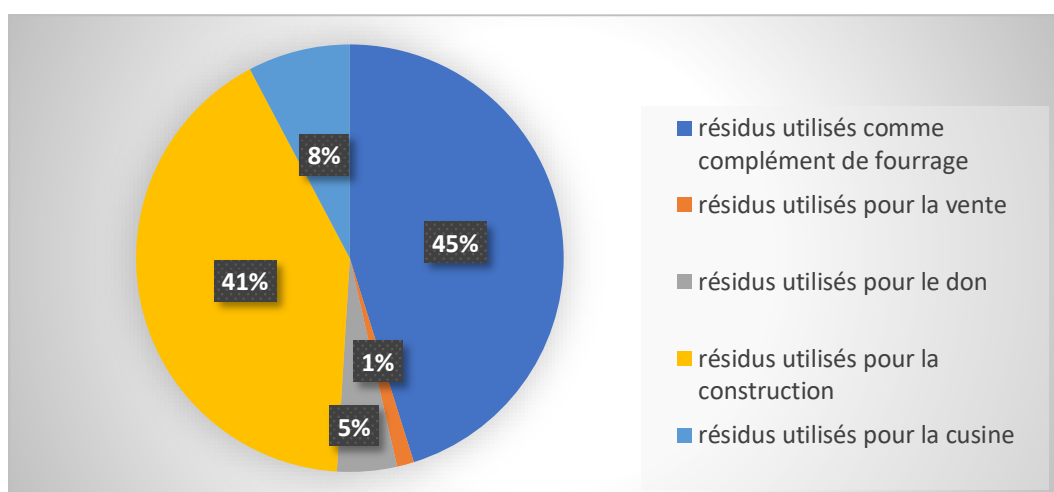


Figure 10:Répartition des résidus issus des récoltes

Les résidus de culture fournissent une contribution dans l'alimentation des animaux. Ainsi, 45 % de ces derniers sont destinés à servir de complément fourrager. Ces résidus peuvent aussi servir à la construction de huttes, clôtures ou de cases. C'est la deuxième utilisation des résidus

avec 41 % des parts. Ce sont préférentiellement les tiges de mil et maïs qui sont utilisés de par leur rigidité. La cuisine peut avoir une part des résidus. Il s'agit des feuilles de niébé qui servent à faire de sauce à un couscous très apprécié chez les peulhs. L'aspect économique des résidus n'est pas aussi important différemment des dons, premiers usages aussi bien pour les cultures que les résidus.

III.1.4 Avenir de l'agriculture dans le département de Ranérou, Ferlo

74,66 % de notre échantillon nourrit le souhait d'avoir au moins un de leurs enfants faisant le métier d'agriculteur. Même si l'élevage occupe la place la plus importante chez les habitants de la zone, l'agriculture gagne de plus en plus de terrain par ces nombreux avantages. Si les 58,92 % des interviewés pensent que c'est un moyen de préserver l'héritage patrimonial de la famille, sur les 21 villages visités au moins 3,57 % sont conscients que c'est un des piliers du développement. Le diagramme suivant (figure 9) montre clairement une tendance favorable à l'augmentation des pratiquants de l'agriculture dans la zone. Cependant, il y a 44 % de pessimistes.

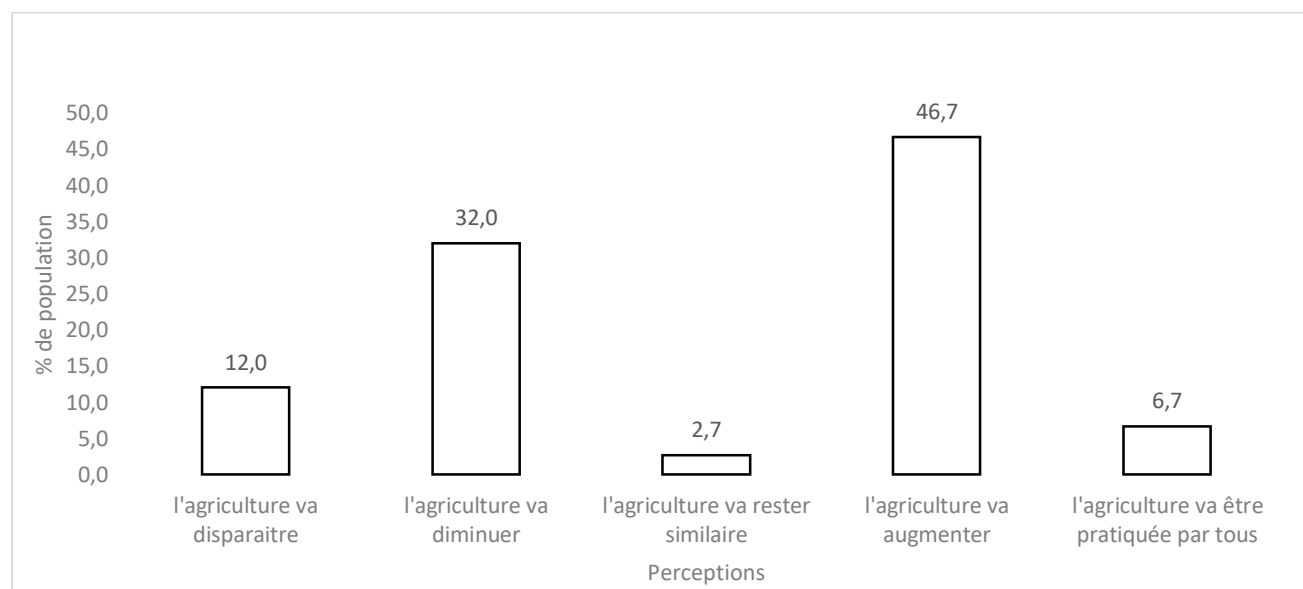


Figure 11: Perception par la population sur l'avenir pour l'agriculture dans le département de Ranérou

III.2 Effet des espèces ligneuses sur la culture du niébé

III.2.1 Sur les potentiels infectieux mycorrhizogènes des sols cultivés (MPN)

Les résultats sur les potentiels infectieux mycorrhizogènes des différents sols cultivés sont indiqués dans le tableau 3. Ces résultats montrent qu'en présence comme en absence d'arbre, les sols renferment des propagules endomycorhiziennes. Avant la culture du niébé, les MPN sont plus élevés sous couvert végétal qu'en dehors du couvert. A 1/3 du houppier, le MPN est beaucoup plus élevé sous *Balanites aegyptiaca* que sous *Vachellia senegal*. Ces MPN

deviennent identiques à partir de 2/3 du houppier sous les 2 espèces végétales. Après la culture du niébé, les résultats montrent une augmentation du MPN en hors couvert et une diminution en sous couvert quels que sois l'espèce végétale et le niveau de prélèvement. Avant comme après la culture, les MPN sont plus élevés à 1/3 du houppier qu'à 2/3 du houppier chez *Balanites aegyptiaca* alors que le contraire est observé chez *Vachellia senegal*.

Tableau 2: Potentiel infectieux mycorhizogène des sols cultivés

Zone de prélèvement (partant du tronc)	<i>Vachellia senegal</i>		<i>Balanites aegyptiaca</i>		Hors couvert	
	Avant culture	Après culture	Avant culture	Après culture	Avant culture	Après culture
1/3 du houppier	992,06	463,45	1489,18	660,69	660,69	1489,18
2/3 du houppier	1331,55	660,69	1331,55	463,45		

*Ces chiffres représentent les nombres probables de propagules viables sans les sols étudiés

III.2.2 Sur les paramètres de mycorhization

L'observation des racines de niébé cultivées dans les trente premiers jours a permis de détecter des structures mycorhiziennes. Les fréquences et les intensités de mycorhization des racines ont ainsi été déterminées suivant la méthode de Trouvelot et *al.* (1985).

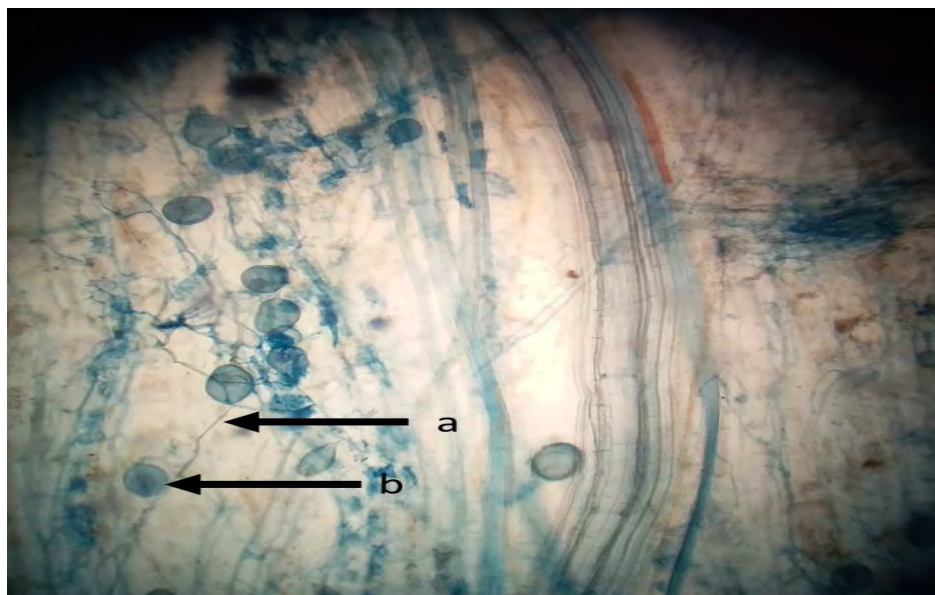


Photo 5: Racine de niébé mycorhizée

*a= hyphe, b=vésicule.

III.2.2.1 Fréquences de mycorhization

III.2.2.1.1 FREQUENCES MOYENNES DE MYCORHIZATION DU NIEBE

Le test non-paramétrique (test de Kruskal Wallis), montre que les fréquences de mycorhization du niébé en hors couvert à 30 jours après semis (98,33 %) sont statistiquement plus élevées ($p=0,028$) que celles du niébé sous *Vachellia senegal* (79,87 %). Le niébé cultivé sous *Balanites aegyptiaca* présente des valeurs intermédiaires (86,83 %).



Figure 12: Fréquences de mycorhization du niébé

*les lettres identiques indiquent une différence statistiquement non significative

*les barres d'erreur représentent les erreurs type.

III.2.2.1.2 FREQUENCES DE MYCORHIZATION DU NIEBE EN SOUS COUVERT VEGETAL SUIVANT LA POSITION PAR RAPPORT A L'ARBRE

Les fréquences de mycorhization varient entre 78 et 87 % autour des espèces ligneuses avec des valeurs plus élevées autour des Balanites notamment au nord et au sud des arbres. Cependant, aucune différence significative ($p=0,56$) n'a été notée entre les fréquences de mycorhization des plants de niébé, en sous couvert, suivant la position par rapport à l'arbre aussi bien chez *Balanites aegyptiaca* que chez *Vachellia senegal*.

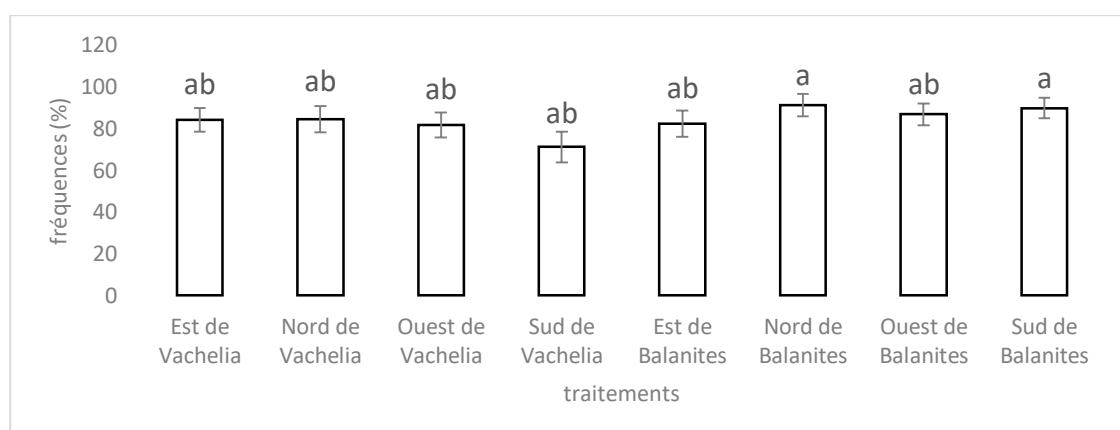


Figure 13: Fréquences de mycorhization du niébé suivant la position autour de l'arbre.

*Les barres avec les lettres indiquées indiquent une différence statistiquement non significative, la barre d'erreur représente l'erreur type.

III.2.2.2 Intensités de mycorhization

III.2.2.2.1 INTENSITES MOYENNES DE MYCORHIZATION

Les intensités de mycorhization des plants de niébé sont statistiquement plus élevées ($p=0,078$) quand le niébé est cultivé en hors couvert (32,85 %) que sous couvert d'espèces ligneuses (18,32 % et 16,91 % respectivement pour *Balanites* et *Vachellia*).

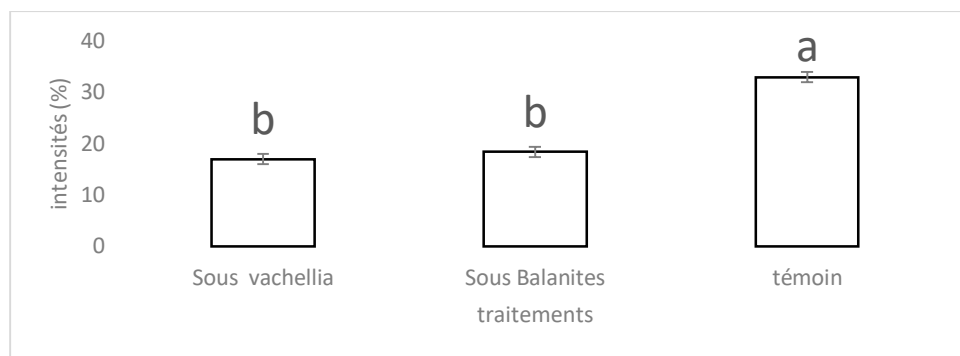


Figure 14: Intensités de mycorhization du niébé.

*Les barres avec les lettres identiques indiquent une différence statistiquement non significative

*les barres d'erreur représentent les erreurs type.

III.2.2.2.2 INTENSITES DE MYCORHIZATION DU NIEBE EN SOUS COUVERT SUIVANT LA POSITION PAR RAPPORT A L'ARBRE

Les intensités de mycorhization du niébé sont comprises entre 8 et 28 % en sous couvert ligneux. Dans cet intervalle de 20 %, s'étendent suivant les quatre directions les intensités obtenues avec des différences statistiques faibles ($p=0,1$). Dans les sous-parcelles à *V.senegal*, aucune différence significative n'a été notée entre les intensités de mycorhization du niébé suivant la position par rapport à l'arbre. Dans les sous-parcelles à *Balanites*, les plants au Sud ont des intensités de mycorhization (28 %) significativement différentes de celles des plants à l'Est de l'arbre (8 %), qui sont les plus faibles observées autour des arbres avec une grande variabilité et des différences significatives. Dans ces derniers, les directions opposées occupent les deux extrémités de l'intervalle avec au Sud le pourcentage d'intensité moyen le plus élevé (28,54 % a) suivi du Nord (24,88 % ab).

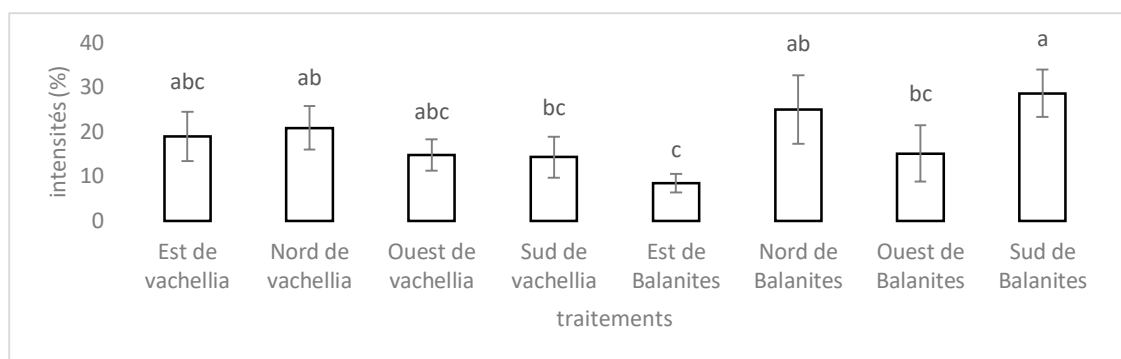


Figure 15: Intensités de mycorhization suivant la position autour de l'arbre.

*Les barres avec les lettres identiques ne sont pas statistiquement différentes

*La barre d'erreur représente l'erreur type.

III.2.2.3 Effet de la distance par rapport à l'arbre sur les paramètres de mycorhization

La distance entre les plants de niébé et le pied de l'espèce ligneuse n'a pas d'effet significatif sur les paramètres de mycorhization. L'intensité ($p=0,73$) et la fréquence ($p=0,92$) ne varient pas statistiquement avec la distance par rapport à l'arbre.

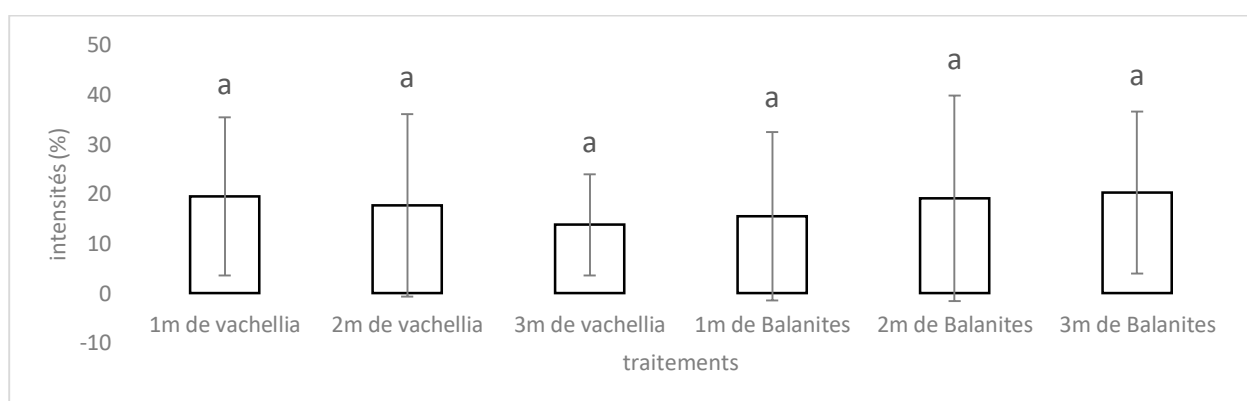


Figure 16 : Intensités de mycorhization du niébé sous couvert

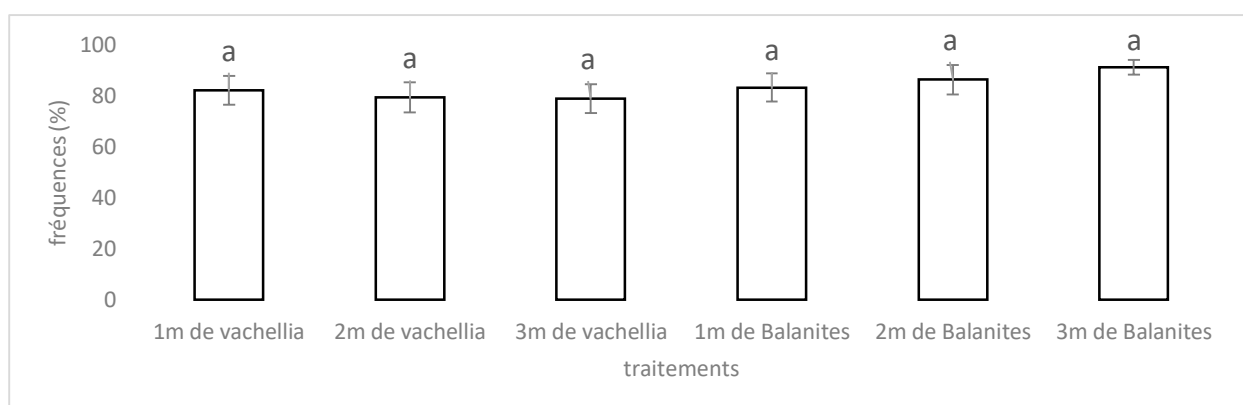


Figure 17 : fréquences de mycorhization du niébé sous couvert

*Les barres avec des lettres identiques indiquent une différence statistiquement non significative.

*La barre représente l'erreur type.

III.2.3 Sur les paramètres de croissance

III.2.3.1 Hauteurs des plants

III.2.3.1.1 LA HAUTEUR MOYENNE DU NIEBE

La croissance en hauteur du niébé a été suivie lors du premier mois à intervalle régulier. Les mesures soumises au test de Kruskal Wallis montrent qu'à 10 jours après semis (JAS), il n'y a pas de différence significative ($p=0,15$) entre les plants des différents traitements. A 20 JAS les plants sous *Balanites* ont des hauteurs statistiquement plus importantes ($p=0,01$) que celles des plants des autres traitements. A 30 JAS, la hauteur du niébé est statistiquement plus importante ($p=0,02$) en sous couvert qu'en hors couvert. A 30 JAS, la présence des espèces ligneuses a eu un effet positif sur la croissance en hauteur des plants de niébé.

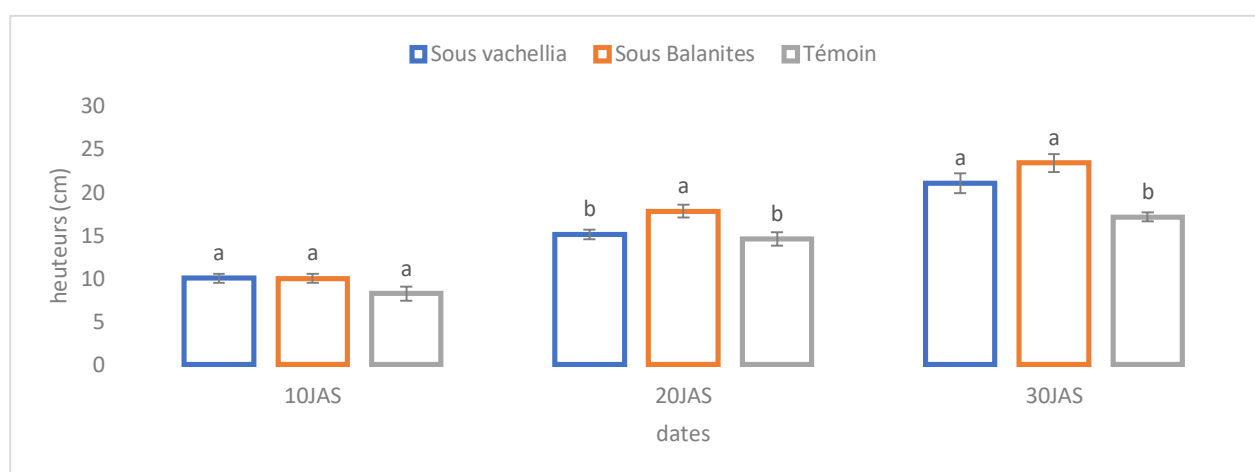


Figure16 : hauteurs des plants de niébé.

*les lettres identiques indiquent une différence statistiquement non significative

*les barres d'erreur représentent les erreurs type.

III.2.3.1.2 HAUTEUR DES PLANTS DE NIEBE SUIVANT LA POSITION PAR RAPPORT A L'ARBRE

C'est à partir de 20 JAS que des différences significatives ($p=0,001$) sont observées entre les hauteurs des plants des différents traitements. La croissance de plants de niébé les plus importantes est observée à l'Ouest des Balanites et ces hauteurs sont significativement plus importantes de celles notées à l'Est des Vachellia.

A 30 JAS, les plants à l'Ouest des Balanites restent les plus hauts et leurs hauteurs sont significativement différentes de celles notées chez les plants à l'Est et au Nord des pieds de Balanites et à l'Est et à l'Ouest des Vachellia.

La différence de croissance est plus significative entre les plants situés au Sud et à l'Ouest. Dans les sous-parcelles à *Balanites*, la différence de croissance est significative entre les plants situés à l'ouest et au Nord.

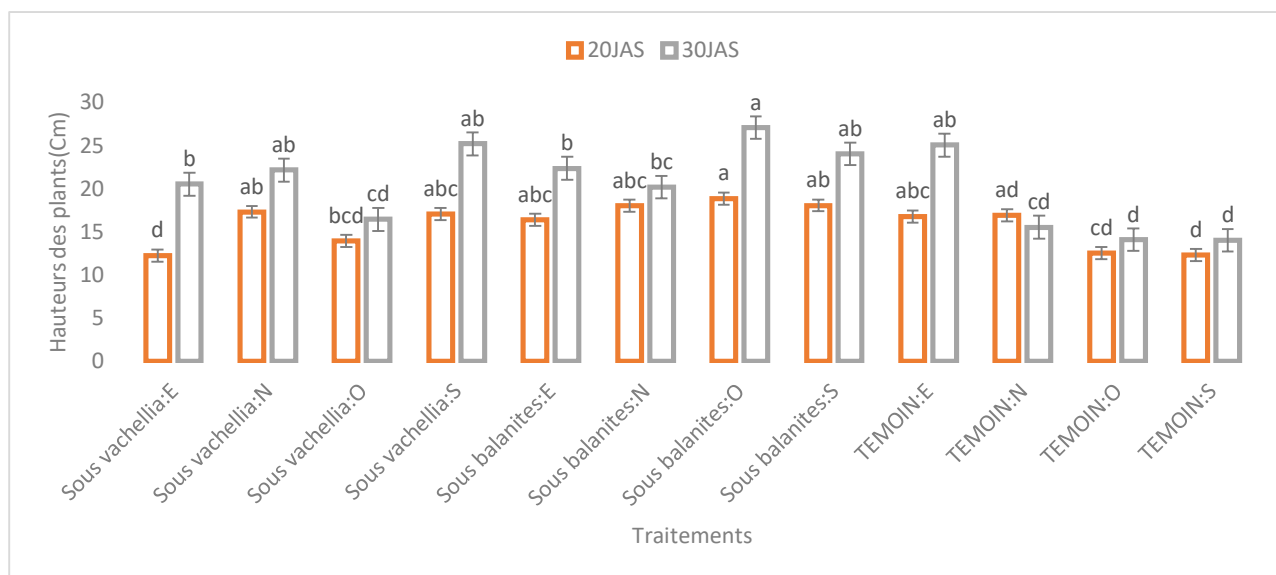


Figure 18:Hauteurs du niébé à 20 et 30 JAS après semis suivant la position par rapport à l'arbre

*les lettres identiques indiquent une différence statistiquement non significative

*les barres d'erreur représentent les erreurs type.

III.2.3.2 La ramification du niébé

III.2.3.2.1 NOMBRE MOYEN DE RAMIFICATIONS DU NIEBE

Les nombres de ramifications latérales émises par la tige du niébé des différents traitements sont significativement proches aussi bien à 60 JAS qu'à 70 JAS. Il n'y a donc eu aucun effet significatif de l'arbre sur le nombre de ramifications du niébé ($p=0,24$).

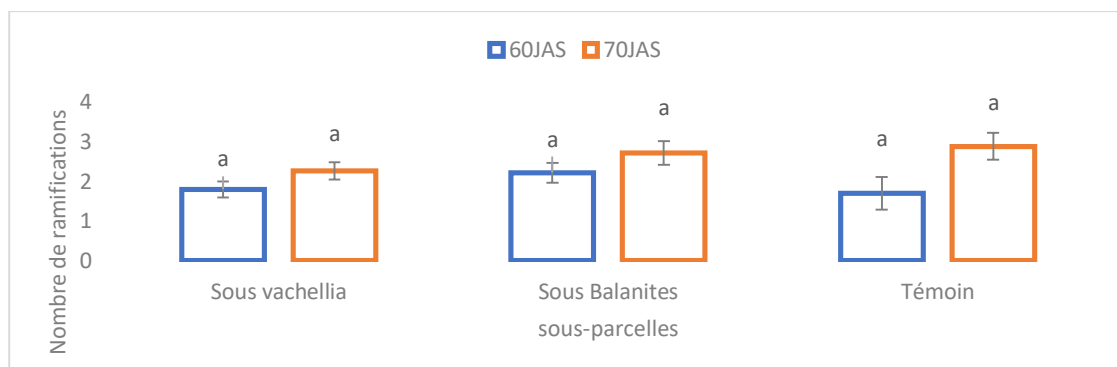


Figure 19:Nombre de ramifications du niébé dans les différentes sous parcelles.

*les lettres identiques indiquent une différence statistiquement non significative

*les barres d'erreur représentent les erreurs type.

III.2.3.2.2 NOMBRE DE RAMIFICATIONS SUIVANT LA POSITION DES PLANTS PAR RAPPORT A L'ARBRE

Suivant la direction, il n'y a pas de différence significative du nombre de ramifications émises par la tige du niébé à 50 JAS, 60 JAS au 70 JAS dans les différentes positions par rapports aux ligneux

A la récolte (80 JAS), la croissance latérale a encore augmenté avec trois groupes de significativités. C'est aux directions Est qu'elle est plus significative dans les parcelles à *Balanites* et Sud chez les pants avec *Vachellia* (figure 19).

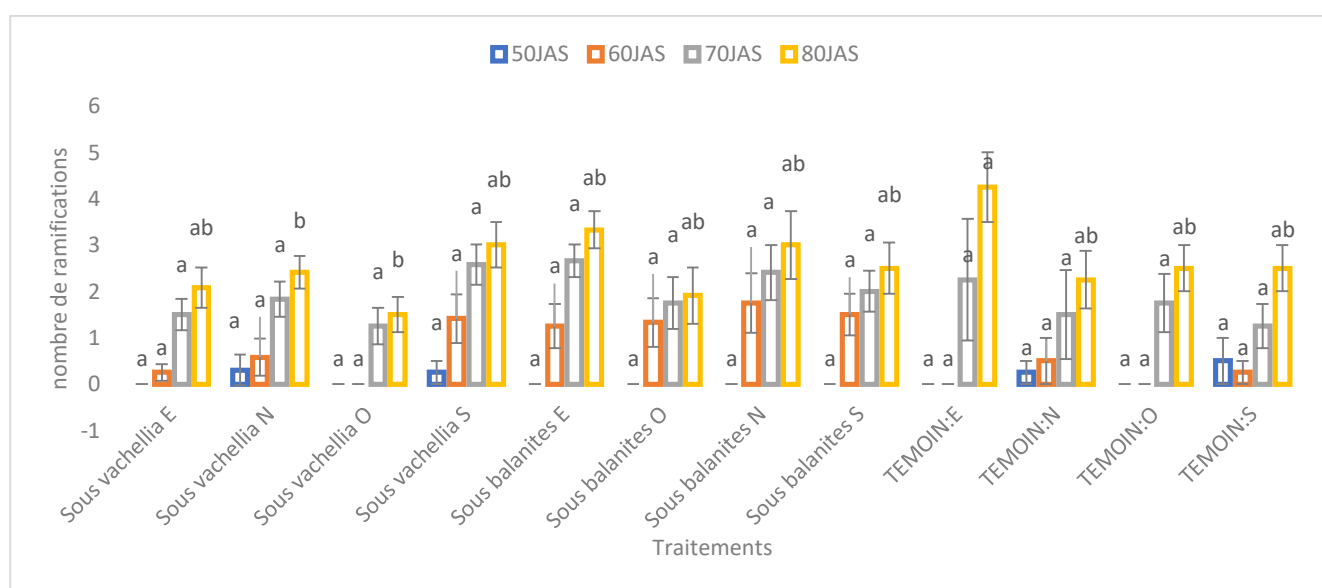


Figure 20: Nombre de ramifications suivant la position des plants par rapport à l'arbre.

*Les barres avec les lettres identiques ne sont pas statistiquement différentes

*La barre d'erreur représente l'erreur type.

III.2.3.3 Effet de la distance par rapport à l'arbre sur les paramètres de croissance

III.2.3.3.1 SUR LA CROISSANCE EN HAUTEUR

La hauteur des plants de niébé à 1 m de *Balanites* sont significativement plus importantes que celles notées aux autres distances par rapport à l'arbre. Cette différence statistique est significative aussi bien à 20 JAS ($p=0,17$) qu'à 30 JAS ($p=0,01$). Au-delà de 10 JAS, les meilleures croissances du niébé sont notées dans les parcelles autour de *Balanites* et à 1 m de l'arbre (figure 19).

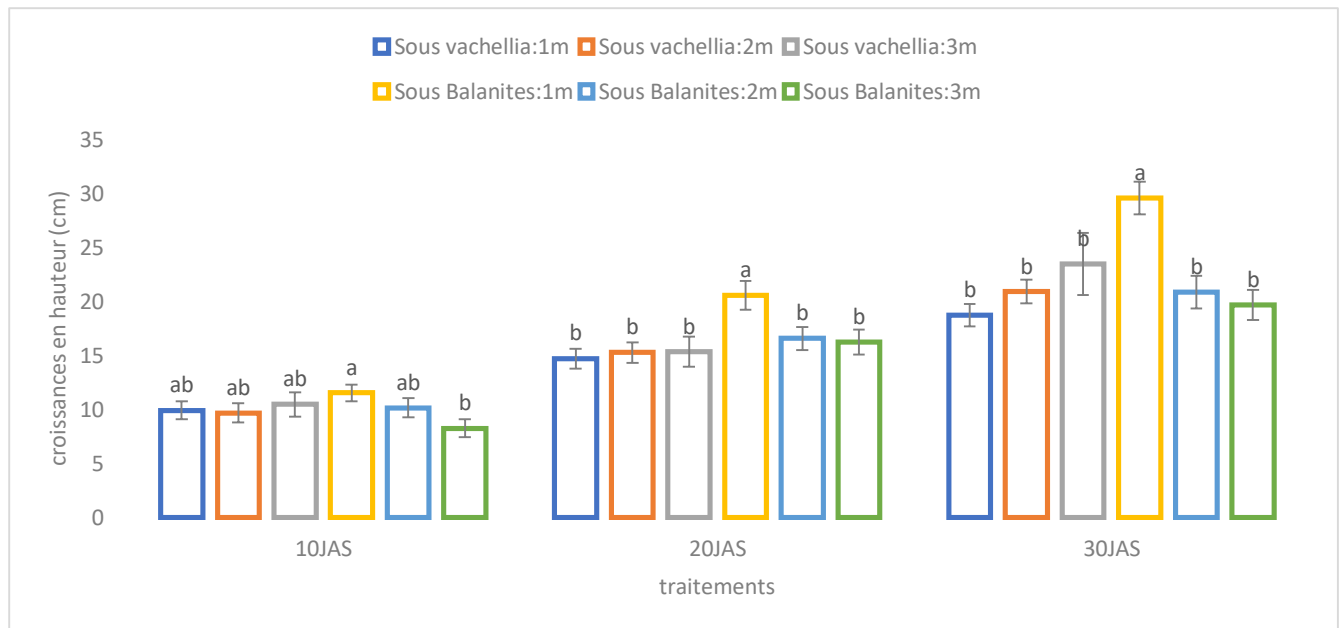


Figure 21: Croissance en hauteur du niébé suivant l'écartement avec l'arbre.

*Les barres avec les lettres identiques ne sont pas statistiquement différentes

*La barre d'erreur représente l'erreur type.

III.2.3.3.2 SUR LE NOMBRE DE RAMIFICATIONS

Les nombres de ramifications les plus importants ont été notés dans les parcelles sous couvert *Balanites aegyptiaca*. A partir de 50 JAS, les nombres de ramifications des plants de niébé sont observés à la distance de 1 m de *Balanites aegyptiaca* et sont significativement différents de ceux observés aux autres distances chez la même espèce et aux nombres notés chez *Vachellia senegal* quelle que soit la distance. Ce nombre diminue donc lorsqu'on s'éloigne du pied de l'arbre (à 3 m). Avec *Vachellia*, les premières croissances latérales ont été enregistrées à 3m de *Vachellia* au 40^e JAS avec une moyenne de 0,25 tiges. Cependant, le nombre de ramifications est plus important avec *Balanites* plus on s'approche de son pied, on y enregistre une moyenne de 4,625 tiges à 80 JAS (figure 21).

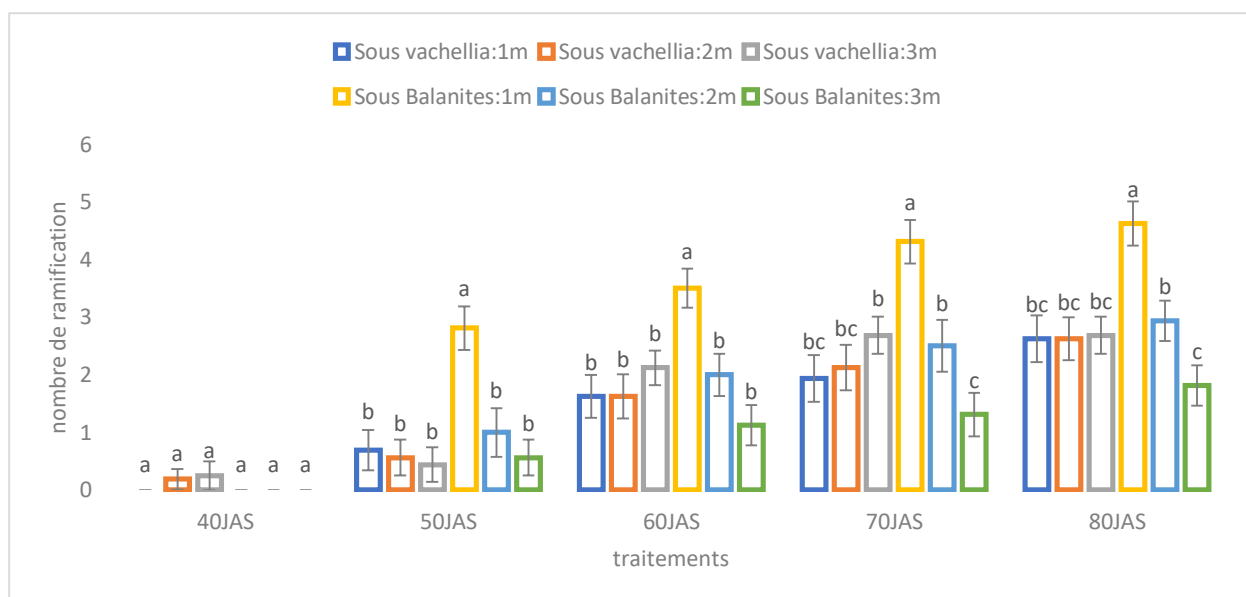


Figure 22: nombre de ramifications du niébé suivant l'écartement avec l'arbre.

*Les barres avec les lettres identiques ne sont pas statistiquement différentes.

*La barre d'erreur représente l'erreur type.

III.2.4 Sur la biomasse du niébé

III.2.4.1.1 BIOMASSES AERIENNES DU NIEBE

Nos résultats montrent qu'il y a une différence statistique ($p=8,9 \cdot 10^{-5}$) du poids de la biomasse aérienne (tige et feuilles) entre les sous-parcelles. Sous *Balanites aegyptiaca*, la biomasse du niébé est plus importante, mais ne diffère pas statistiquement de celle du niébé des parcelles témoins. Cependant, cette biomasse est significativement différente celle observée sous *Vachellia senegal*. La présence de *Balanites aegyptiaca* est donc favorable à une augmentation de biomasse du niébé alors que celle de *Vachellia senegal* la réduit significativement.

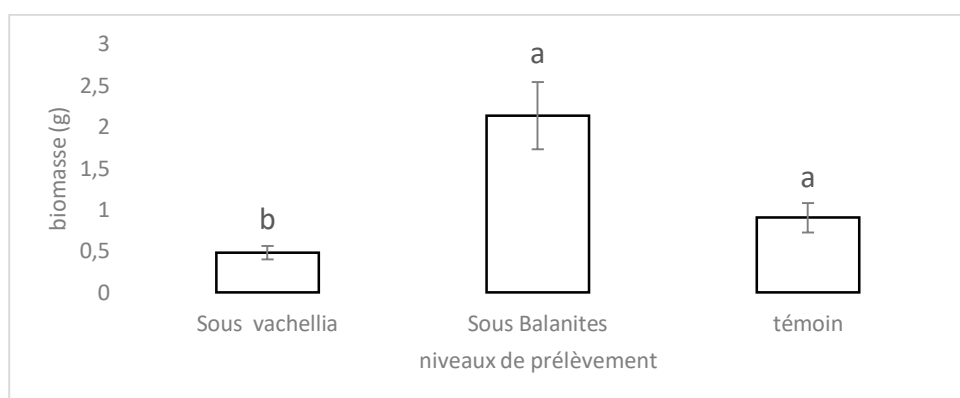


Figure 23: Biomasses aérienne du niébé à 30 JAS.

*les lettres identiques indiquent une différence statistiquement non significative.

*les barres d'erreur représentent les erreurs type.

III.2.4.1.2 BIOMASSES RACINAIRES

Les biomasses racinaires de nos différents traitements sont statistiquement différentes ($p=0,007$) quand le niébé est cultivé seul ou en association avec les espèces ligneuses. La biomasse racinaire du niébé est plus importante dans les sous-parcelles à *Balanites* (0,38 g), intermédiaires chez les témoins (0,21 g) et plus faible dans les sous-parcelles à *Vachellia* (0,18 g). La présence de *Balanites aegyptiaca* augmente la biomasse racinaire du niébé alors que celle *Vachellia senegal* la réduit. La biomasse racinaire du niébé sous *Balanites* est significativement plus importante de celle du niébé sous *Vachellia*.

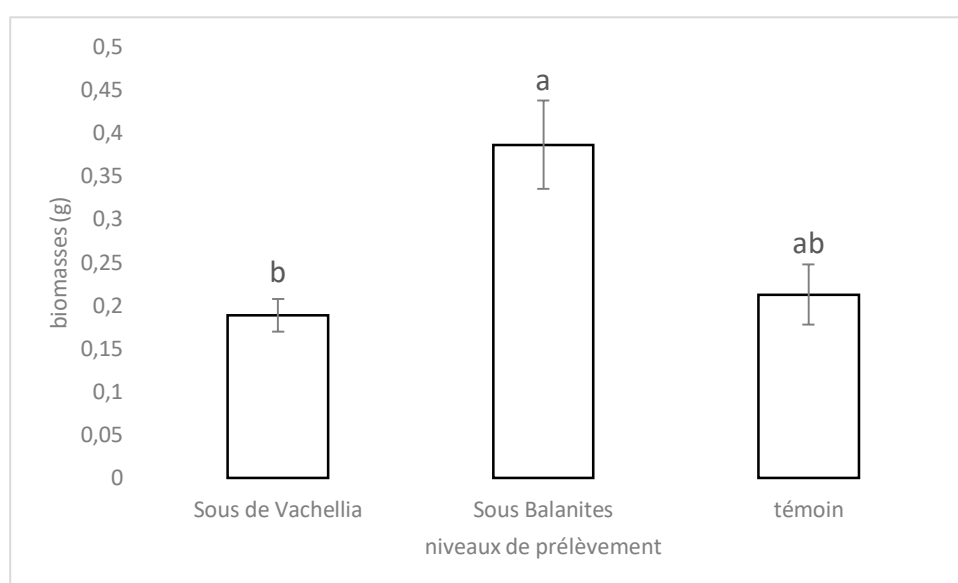


Figure 24: Biomasses racinaire du niébé à 30 JAS.

*les lettres identiques indiquent une différence statistiquement non significative.

*les barres d'erreur représentent les erreurs type.

III.2.4.1.3 EFFET DE LA POSITION PAR RAPPORT A L'ARBRE SUR LA BIOMASSE

Si le poids de la biomasse aérienne sèche varie entre les sous-parcelles à *balanites* et celle à *Vachellia*, il varie aussi suivant la direction entre eux ($p=0,0005$).

Les résultats montrent que les biomasses racinaires et aériennes sont plus élevées chez les plants de niébé sous *Balanites* que dans les parcelles autour des *Vachellia*. Chez les plants sous *Vachellia*, ces biomasses ne sont pas significativement différentes suivant la position des plants par rapport à l'arbre. Des différences significatives entre les biomasses sont cependant observées chez les plants de niébé autour des *Balanites* chez lesquels on note des poids plus importants à l'ouest et au sud des arbres.

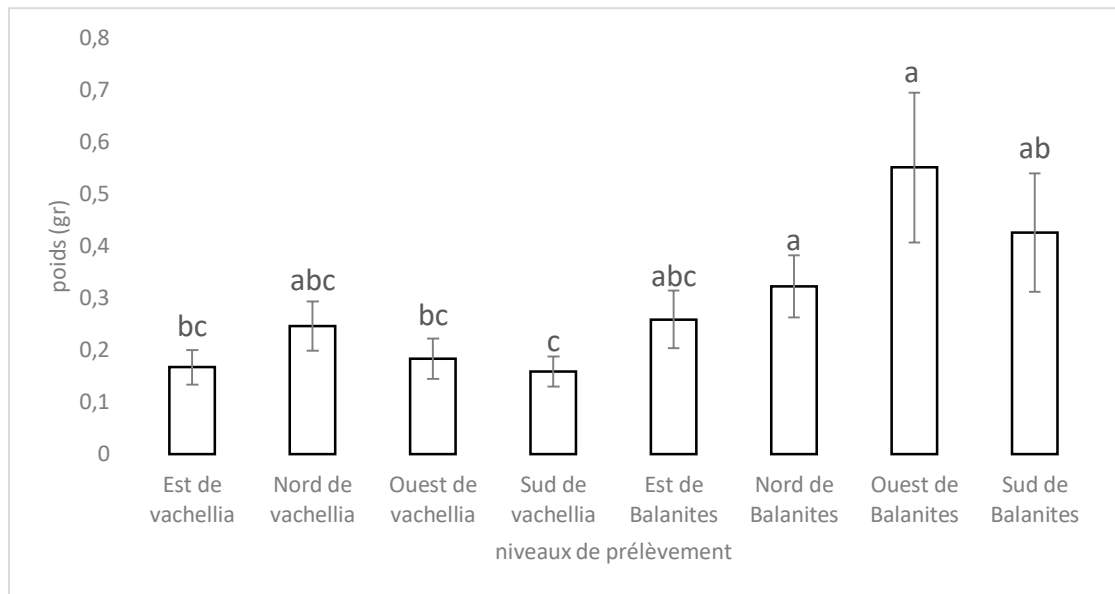


Figure 25: Biomasse racinaire du niébé selon la direction à 30 JAS.

*Les barres avec les lettres identiques ne sont pas statistiquement différentes.

*La barre d'erreur représente l'erreur type.

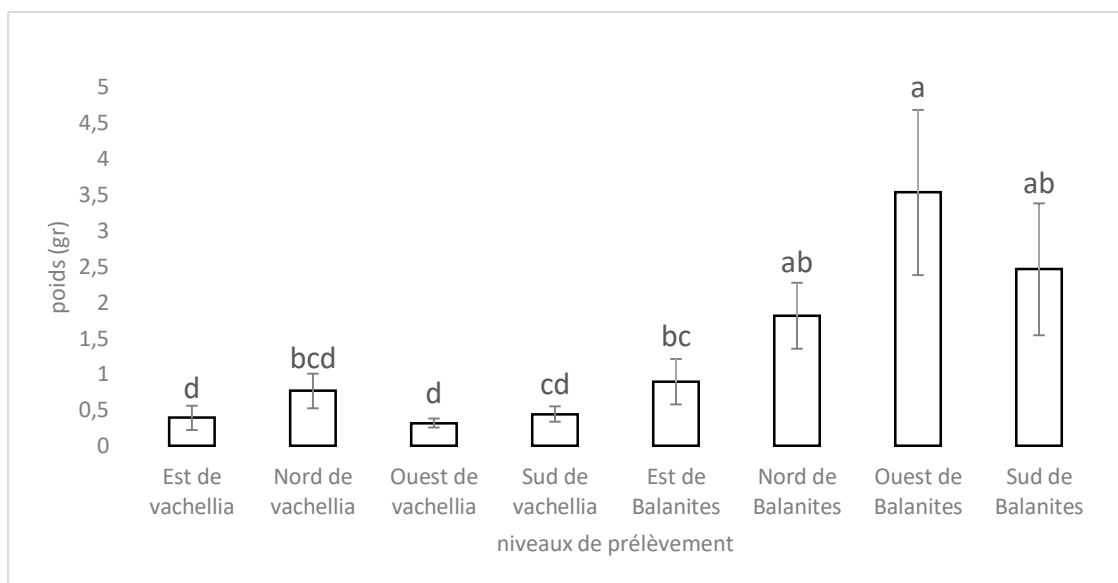


Figure 26: Biomasse aérienne du niébé selon la direction à 30 JAS.

*Les barres avec les lettres identiques ne sont pas statistiquement différentes.

*La barre d'erreur représente l'erreur type.

III.2.4.1.4 EFFET DE LA DISTANCE PAR RAPPORT A L'ARBRE SUR LA BIOMASSE DU NIEBE

Les biomasses aériennes et racinaires sont significativement plus faibles dans les parcelles à *Vachellia senegal* que dans les parcelles à *Balanites aegyptiaca*. Sous couvert *V. senegal*, aucune différence significative n'a été notées entre les biomasses suivant la distance par rapport

à l'arbre (figure 26 et 27). Sous couvert *B. aegyptiaca*, les biomasses aériennes et racinaires décroissent avec la distance et des différences significatives sont notées entre les biomasses à 1 m et celles observées à 3 m (figure 26 et 27).

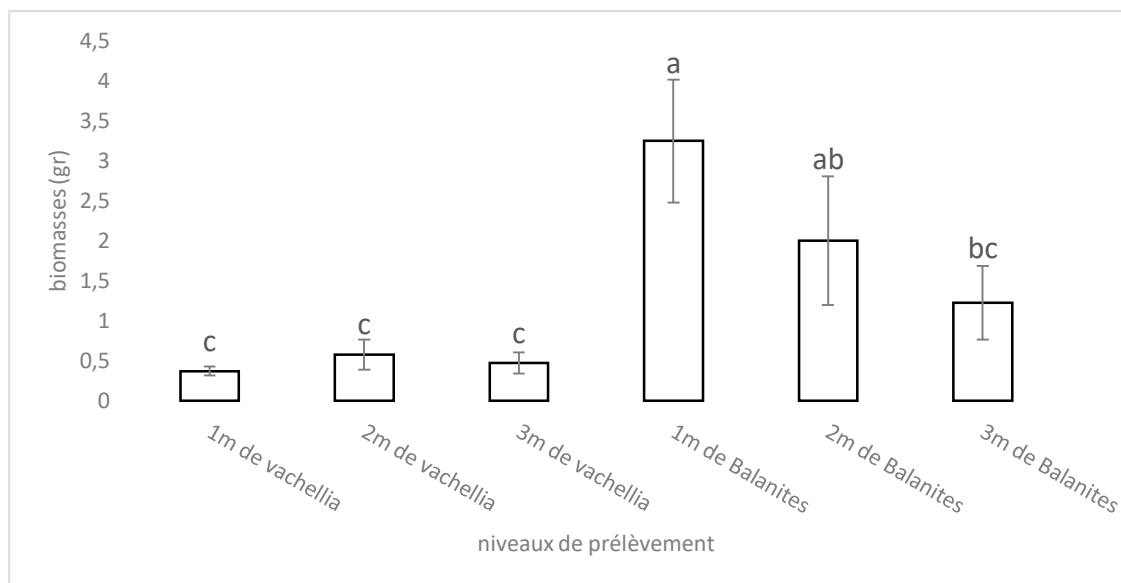


Figure 27: Biomasses aérienne du niébé suivant l'écartement avec le pied de l'arbre à 30 JAS.

*Les barres avec les lettres identiques ne sont pas statistiquement différentes.

*La barre d'erreur représente l'erreur type.

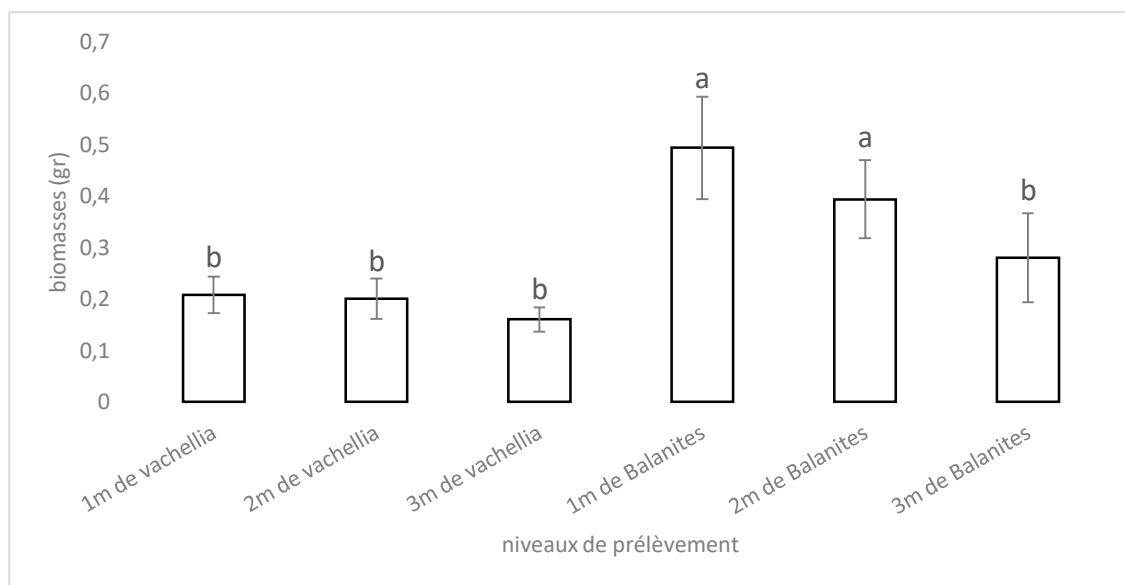


Figure 28: Biomasses racinaire du niébé suivant l'écartement avec le pied de l'arbre à 30 JAS.

*Les barres avec les lettres identiques ne sont pas statistiquement différentes.

*La barre d'erreur représente l'erreur type.

III.2.5 Sur le rendement du niébé

La comparaison des rendements en graines obtenus après récolte montre que le niébé est beaucoup plus productif ($p=0,009$) quand il est cultivé en association avec *Balanites aegyptiaca*. Les moyennes de rendement peuvent aller jusqu'à 0,752t/ha dans ces sous-parcelles. Ces rendements sont significativement plus importants que ceux obtenus dans les sous parcelles témoins (0,052t/ha). Les rendements du niébé sous-couvert *Vachellia senegal* (0,227t/ha) sont statistiquement supérieurs à ceux des témoins.

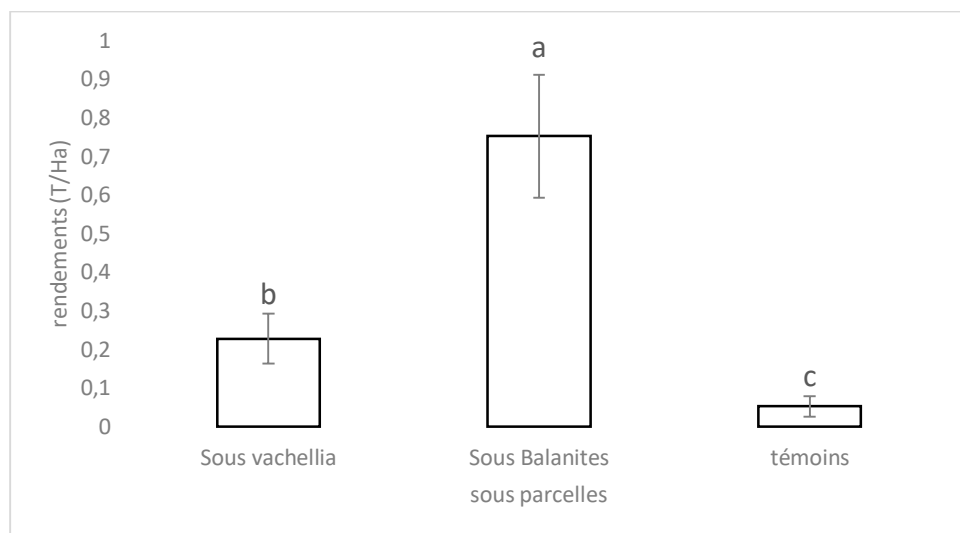


Figure 29: Productivité du niébé a la récolte.

*les lettres identiques indiquent une différence statistiquement non significative.

*les barres d'erreur représentent les erreurs type.

IV. Discussion

IV.1 Perception de la population sur les pratiques agricoles

Le niébé (*Vigna unguiculata* (L) Walp.) est une légumineuse alimentaire largement cultivée dans le monde avec une production estimée à 3,3 millions de graines sèches dont 64 % sont réalisés en Afrique. C'est une légumineuse riche en protéines végétales, 20 à 25 % de son poids sec, soit 2 à 3 fois celle de la majorité des céréales. Les feuilles par exemple servent d'éléments de base dans la préparation de la sauce du couscous « xaako ». La fane est aussi un appoint important pour le bétail pour sa teneur en protéines importante. Ainsi, tout au long de son évolution au champ, sa consommation est continue. L'estimation de la production en gousses sèches est rendue ainsi difficile par ce type d'utilisation. Avant la fin du cycle et à la récolte des dernières gousses, la quasi-totalité de la production est déjà consommée. De plus, *Vigna unguiculata* appartient à la grande famille des légumineuses d'où sa capacité à fixer le diazote atmosphérique pour le transformer en azote assimilable par une plante. L'azote est un élément essentiel dans la fertilisation des terres arides du Sahel. C'est aussi une espèce capable de réaliser une symbiose avec les bactéries de type rhizobium et les champignons AM participant à la fertilisation minérale des sols.

La fertilité minérale d'un sol traduit sa richesse en élément fertilisant (macro et microéléments). Ils proviennent essentiellement de la minéralisation de la matière organique du sol et de l'altération des roches du sous-sol. Elle peut aussi être renforcée par des apports extérieurs (engrais chimique ou organique). Restituer au sol les éléments nutritifs après la récolte constitue un des principes fondamentaux de la durabilité. L'épandage reste une solution favorable pour renforcer la fertilité des sols chez ces agro-pasteurs peuls où l'agriculture est à 32,14 % un moyen de subsistance. La présence de l'arbre offre aussi d'autres biens des services. Sous son feuillage peut exister un microclimat différent pouvant être caractérisé par la presque absence de rayons du soleil, des températures plus basses et une humidité plus élevée. Ces conditions sont favorables pour le repos après un dur labeur ainsi qu'au cheval qui sert au transport. C'est sous son houppier que sont gardés l'eau et les autres petits matériels. Outre ces services, l'arbre aussi peut jouer d'autres rôles. Certaines essences peuvent participer à la fertilisation des sols notamment *Vachellia senegal* par sa possibilité de faire des symbioses bactérienne (Vassal, 1998). Le feuillage de l'arbre en plus des résidus de récolte peut constituer un apport de matières organiques au sol.

De manière générale, les résidus de récolte sont riches en éléments minéraux issues des stocks de nutriments nécessaires au développement des cultivars. Le contrat de fumure gagnant-gagnant entre l'agriculture et l'élevage assure la survie des deux systèmes. Les zones de cultures

constituent de véritables réserves fourragères dont la qualité est maintenue en partie par un plus long séjour des animaux sur les champs pour le fumier (Sy, 2011). En Afrique et en Asie, les épis de mil, les tiges et les feuilles qui constituent la paille sont utilisés pour d'autres fins dont entre autres, l'alimentation animale, la construction des maisons ou comme fertilisant lorsque les chaumes sont laissés sur place dans les champs (Hamadou, et al., 2017). Ce complément assure ainsi une double fonction de nourriture et fertilisant d'où l'importance de cultiver pour assurer le développement agricole.

La tendance favorable à une augmentation de la pratique agricole dans le Ferlo peut se justifier par plusieurs faits. 58,92 % des interviewés pensent que c'est un moyen de préserver l'héritage patrimonial de la famille. Pour les 74,66 % de notre échantillon qui nourrissent le souhait d'avoir au moins un enfant agriculteur, deux justificatifs majeurs alimentent ce souhait à savoir que :

- l'agriculture peut être un bon moyen de subsistance mais aussi le meilleur moyen de préserver le patrimoine familial (les terres) ;
- à cela s'ajoute la valeur qu'offre l'agriculture aux peuls pasteurs. C'est un gage de respect et de considération pour l'éleveur qui en plus, détient des terres agricoles pour nourrir sa famille et diminue ainsi la dépendance aux revenus du bétail.

Les pessimistes mettent en exergue les difficultés qui font frein à la pratique. C'est un travail pénible qui demande un coup en matériels et en main d'œuvre très souvent indisponibles. La saison pluvieuse courte avec des pauses qui interviennent fréquemment a un impact très négatif sur la rentabilité des cultures. Même avec un retour vers des conditions humides, les quantités de pluie recueillies restent inférieures à celles d'avant les années 1970. Dans cette partie nord du pays, la pause pluviométrique intervient entre le 3 et le 7 Aout (Dieng, et al., 2008). Ce sont ainsi des obstacles rencontrés lors de leurs campagnes, mais qui n'excluent pas le désir d'évoluer dans ce secteur prometteur. Ce sentiment à l'égard d'une agriculture qui tend vers une diminution ou une disparition ne se traduit pas seulement par leur préoccupation sur les difficultés rencontrées lors de l'hivernage. En effet, le cheptel ne nourrit plus son homme autant que dans les dernières décennies. Or, dans une réserve sylvo-pastorale, des restrictions sont apportées sur les cultures industrielles. Malgré tous des populations s'investissent de plus en plus dans le milieu agricole.

IV.2 Effet de *Vachellia senegal* Willd et *Balanites aegyptiaca* Del sur les paramètres étudiés

Nos résultats démontrent un nombre de propagules fongique viables élevé sous couvert par rapport aux témoins avant le semis du niébé. Ce nombre baisse dans le sol après culture et de

manière plus importante dans les parcelles sous couvert. En effet selon les études de Plenchette *et al.* (1983) et Ndoye (2012), *Vachellia senegal* améliore le potentiel de mycorhization du sol ce qui explique les valeurs du MPN élevé trouvées sous cette espèce. Cette amélioration est cependant plus marquée sous *B. aegyptiaca*. Les meilleurs potentiels mycorhizogènes observés en sous couvert, pourraient être dus aux propriétés physico-chimiques des sols, le micro-climat ou même la diversité des microorganismes. Ainsi, les fréquences de mycorhization trouvées ne sont pas en concordance avec les potentiels de mycorhization des sols. Selon Nouaim & Chaussod (1996), une plante mycorhisée aura besoin de davantage d'eau qu'un « témoin » non mycorhizé. Cependant, les taux de mycorhization sont plus faibles dans les sous-parcelles couvertes. Ces derniers seraient donc moins mycorhizés et donc moins limités par l'eau disponible. La baisse des valeurs de MPN est conforme à l'opinion admise que les champignons mycorhiziens sont en moins grand nombre dans les sols très fertiles. La fertilité des sols réduit le potentiel mycorhizien en affectant le développement des champignons mycorhiziens à vésicules et arbuscules. La diminution des potentiels observée après la récolte concorde avec les faibles intensités de mycorhization observées qui serait due à la présence de la culture. Ainsi l'association culture-ligneux bloquerait la multiplication des CMA.

Dans cette étude, les plants de *Vachellia* ont des houppiers en couronne aplatis donc un feuillage très développé alors que les *Balanites* ont des cimes en balai. Les premiers offrent un meilleur réceptacle aux eaux de pluies. Le houppier en balai est généralement plus aéré et plus perméable à l'eau que le houppier en boule qui semble beaucoup plus compact et donc moins perméable à l'eau. Ceci offre un microclimat particulier avec une réduction de l'évapotranspiration potentiel et une augmentation de l'humidité de l'air et du sol. De plus, le premier type offre un recouvrement plus important avec un ombrage plus conséquent. Zomboudré *et al.* (2005) rapportent une nette amélioration de l'humidité sous les houppiers de karité par rapport aux hors couvert. Nos résultats sur la croissance en hauteur, les biomasses aériennes et racinaires et les rendements de niébé obtenus sont meilleurs sous *Balanites aegyptiaca*. Ce qui permet de dire que les *Balanites* offrent de meilleures conditions pour la culture de cette légumineuse.

La hauteur du niébé est plus importante sous couvert. Il faut noter que le couvert réduit les pertes d'eau et le sol est humide comme le démontre AKPO, (1998). Les croissances plus faibles observées chez les témoins peuvent donc être attribuées au déficit hydrique. N'Gbesso *et al.* (2013) ont démontré que dans les 30 premiers jours de culture, *Vigna unguiculata* réduit sa croissance pour accumuler de l'eau dans ces tissus. L'essentiel des besoins en eau serait donc assuré pendant cette période. Les études de De Barros *et al.* (2007) confirment la capacité du

niébé à s'adapter dans les zones à faibles pluviométries. De plus, le recouvrement conséquent des houppiers de *Vachellia* traduit une diminution de l'intensité lumineuse atteignant les plants. Boubacar (2006) démontre en effet que *Vachellia senegal* représente pour les cultures sous-jacentes un concurrent pour la lumière. Un effet ombrage pourrait expliquer la faiblesse des paramètres étudiés notamment la baisse de la production en matière sèche et en gousses sous cette espèce. Bayala *et al.* (2002) ont montré que l'élagage de la cime des arbres (*Vitellaria paradoxa* (karité) et *Parkia biglobosa* (néré)) a eu un effet significatif positif sur la productivité du millet. L'effet des *Vachellia* sur la productivité semble controversé. Si pour certains l'espèce a des effets positifs sur la productivité, le contraire est constaté pour d'autres. Ainsi El Tahir *et al.* (2009) démontrent un effet négatif sur les cultures adjacentes. En outre, il ressort des études de Saidou *et al.* (2018) que la présence de *Vachellia senegal* est d'une grande importance car créant un environnement agroécologique favorable, mais il existe encore un facteur qui empêche l'expression du potentiel en rendement du niébé. En ce qui concerne les *Balanites*, leurs houppiers pourraient être dits en balai donc étant plus aérés, les températures y sont plus élevées et l'effet d'ombrage y est plus faible comme l'a souligné Zomboudré *et al.*, (2005).

Outre l'effet de l'arbre sur la culture du niébé, la distance entre les poquets de niébé et le pied de l'espèce ligneuse montre des variabilités sur les paramètres étudiés. En ce qui concerne le taux de mycorhization, il reste significativement constant que ce soit à 1 m, 2 m ou 3 m de l'arbre. Ce qui n'est pas le cas pour les paramètres de croissance. La hauteur, le nombre de ramifications et les biomasses enregistrées pour la culture de *Vigna unguiculata* sont plus importantes plus on s'approche du pied des *Balanites*. Le faible recouvrement du houppier de *Balanites* (en moyenne 1,31 m². Ha⁻¹) fait que plus on s'éloigne de son pied plus on sort de l'environnement agroécologique favorable à la survie de la culture. Par contre le recouvrement (2,275389 m². Ha⁻¹ en moyenne) des espèces de *Vachellia* est plus conséquent. Son houppier est plus compact et un peu aplati couvrant ainsi la presque totalité de la sous-parcelle. Ceci pourrait justifier l'homogénéité de ces paramètres suivant l'écartement entre les poquets et le pied de l'arbre. Ces mêmes paramètres étudiés suivant les quatre directions cardinales ne montrent pas de variations. Ce qui nous amène à dire que les directions cardinales (Est, Ouest, Nord et sud) n'ont pas eu d'effet significatif sur la croissance, la mycorhization et les biomasses du niébé.

IV.3 Potentiel agroforestier de la zone sylvo-pastorale de Ranérou (Ferlo)

Le recensement de l'état de connaissances sur les pratiques agricoles à Ranérou et environ et nos expérimentations sur la culture annuelle nous a permis de nous exprimer sur le potentiel agroforestier que peut avoir cette zone sylvo-pastorale. En effet, les méthodes culturales se basent essentiellement sur la fertilisation organique avec l'épandage. Ils n'excluent pas non plus la culture entre les ligneux. D'autres méthodes comme la couverture permanente du sol avec les résidus de culture sont aussi appliquées. En plus des savoir-faire sur les pratiques agricoles des populations, notre enquête nous a aussi permis d'avoir une prévision sur l'avenir de l'agriculture dans la commune de Ranérou. En effet en plus des biens et services que peut offrir la pratique, la population est optimiste pour un développement de l'agriculture. Outre ces résultats issus des questionnaires, ceux issus des expérimentations au champ démontrent que les cultures annuelles en particulier le niébé donnent un bon rendement sur couvert. La culture de *V. unguiculata* sous nos deux espèces ligneuses a montré de bons résultats. Les paramètres de production se sont avérés meilleurs en association avec cependant. L'ensemble de ces résultats peuvent justifier un potentiel agroforestier que peut avoir la zone. Ranérou étant une zone protégée avec des restrictions sur la végétation naturelle, mais aussi une zone de reboisement, les pratiques agricoles doivent être réglementées.

CONCLUSION

Ce travail, entrepris dans le cadre d'un projet de Master avait pour objectif de contribuer à l'amélioration de la productivité des cultures annuelles (*Vigna unguiculata*) dans le Ferlo par la valorisation des communautés microbiennes associées aux espèces forestières *Vachellia senegal* et *Balanites aegyptiaca*.

L'analyse des racines de niébé âgées d'un mois a montré des fréquences et intensités de mycorhization plus élevées chez les témoins. Les espèces forestières n'ont donc pas eu d'effet positif sur les paramètres de mycorhization de la culture. Malgré ce faible taux de mycorhization trouvé en association avec les espèces ligneuses, il y avait par ailleurs un nombre de propagules fongiques plus important sous couvert avant la culture. Les résultats du test MPN ont montré une diminution du potentiel infectieux mycorhizogène des sols à la récolte. Cette réduction est, en effet, plus marquée lorsque la culture est associée aux espèces forestières.

Les paramètres de productivité de la culture (niébé) tels que la biomasse, la croissance et les rendements ont aussi été évalués. Ainsi, les résultats montrent que la croissance du niébé et les rendements obtenus sont meilleur sous couvert par rapport aux témoins. En ce qui concerne la production de biomasses, elle est plus faible quand la culture est associée à *V. Senegal* alors qu'elle est plus élevée avec *B. aegyptiaca*.

En plus de l'effet de l'arbre sur ces différents paramètres, l'effet de la distance entre les cultures et l'arbre a aussi été évalué. Ainsi, sur la mycorhization, il n'y a pas de différence que la culture s'approche (à 1 m) ou s'éloigne (à 3 m) du pied de l'arbre. Pour la croissance du niébé, elle est plus élevée à 1 m de *B. aegyptiaca* qu'à 3 m et contrairement pour l'espèce *Vachellia*. Les biomasses diminuent en s'éloignant du pied de *Balanites*, mais ne montrent pas de différences statistiques sous *Vachellia*.

Les directions cardinales (Est, Ouest, Nord ou Sud) n'ont pas eu d'effets sur les différents paramètres que nous avons étudiés.

Le fait le marquant dans cette étude est que pour tous les paramètres leur effet est plus significatif sous *Balanites aegyptiaca* que sous *Vachellia senegal*. Cette dernière semblerait avoir un effet dépressif sur les biomasses du niébé. Cependant *Vigna unguiculata* est plus productif sous couvert végétal.

Au préalable, une enquête avait été menée au sein de la population de la commune de Ranérou sur les pratiques agricoles. Il en est ressorti des perspectives d'un avenir prometteur de

l'agriculture dans la zone. Il existe des conditions favorables à l'adoption de techniques agroforestières qui seraient des alternatives potentielles pour la population. Cependant, *Vechellia senegal* ne serait pas favorable à une association avec le niébé (*Vigna unguiculata*).

Référence Bibliographique

- Arbonnier, M., 2002. *Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest*. CIRAD. [Montpellier] -- MNHN. Paris -- 2e édition revue et augmentée éd. s.l.:s.n.
- Bakhoun, N., 2012. *Relations entre Acacia senegal (L.) Willd. et les communautés microbiennes du sol: effets sur la fertilité des sols et la durabilité de la production de gomme arabique*, Dakar: UCAD.
- Barea, J.-M., Azcón, R. & Azcón-Aguilar, C., 2002. Mycorrhizosphere interactions to improve plant fitness and soil quality. *Antonie van Leeuwenhoek*, 81(1-4), pp. 343--351.
- Boffa, J.-M., 2000. Les parcs agroforestiers en Afrique de l'Ouest: clés de la conservation et d'une gestion durable. *Unasylva*, 51(200), pp. 11-17.
- Boys, K. A., Fulton, J., Faye, J. M. & Lowenberg-DeBoer, J., 2007. The economic impact of cowpea research in Senegal: An ex-post analysis with disadoption. *Agricultural Economics*, 36(3), pp. 363-375.
- BRAHIM, A., BECHIR, A. B. & MAPONGMETSEM, P. M., 2016. Utilités socioéconomiques et culturelles du *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. (Famille Zygophyllaceae) chez les populations locales de la Région du Ouaddaï au Tchad. *Journal of Applied Biosciences*, Issue 111, pp. 10854-10866.
- Dia, A. & Niang, A., 2012. Le Projet Majeur de la Grande Muraille Verte de l'Afrique : contexte, historique, approche stratégique, impacts attendus et gouvernance. Dans: I. Editions, éd. *Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte Concepts et mise en oeuvre*. s.l.:s.n., p. 493.
- Egli, S. & Brunner, I., 2002. Les mycorhizes, une fascinante biocénose en forêt. *Notice pour le praticien*, 35(8), pp. 1-8.
- Gavériaux, J.-P., 2012. LES GLOMEROMYCOTA : Mycorhizes VAM et Geosiphon pyriformis (Kützing) Wettstein. *Bull. Soc. Mycol. Nord Fr.*, Volume 92, pp. 01-17.
- Kaboré-Zoungana, C., Diarra, B., Adandedjan, C. & Savadogo, S., 2008. Valeur nutritive de *Balanites aegyptiaca* pour l'alimentation des. *Livestock Research for Rural Development*, 20(4), pp. 1-15.
- Kull, C. et al., 2011. Adoption, use and perception of Australian acacias around the world. *Diversity and Distributions*, Issue 17, p. 822–836.
- Kuszala, C. & Gianinazzi, S., 2010. Méthode simple pour évaluer le potentiel endomycorhizogène d'un inoculum. *Cahier des Techniques de l'Inra*, Volume 70, pp. 17-24.
- Leclerc, G. & Sy, O., 2011. *Des indicateurs spatialisés des transhumances pastorales au Ferlo*. [En ligne]
Available at: <http://journals.openedition.org/cybergeogeo/23661>
[Accès le 18 février 2020].
- Li, X.-L., Eckhard, G. & Horst, M., 1991. Phosphorus acquisition from compacted soil by hyphae of a mycorrhizal fungus associated with red clover (*Trifolium pratense*). *New Phytologist*, Volume 119, pp. 304-307.
- Maillet, F. et al., 2011. Fungal lipochitooligosaccharide symbiotic signals in arbuscular mycorrhiza. *Nature*, Issue 469, p. 58–63.

- MICHON, G., DE FORESTA, H. & LEVANG, P., 1995. Stratégies agroforestières paysannes et développement durable: les agroforêts à damar de Sumatra. *Natures Sciences Sociétés*, 3(3), pp. 207-221.
- N'Gbesso, M. P., Fondio, L. & Konaté, D., 2013. Etude des caractéristiques de croissance et de l'état sanitaire de six variétés améliorées de niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp] en zone centre de Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7(2), pp. 457-467.
- PERRIN, R., 1985. L'aptitude des mycorhizes à protéger les plantes contre les maladies : panacée ou chimère ?. *Ann. sci. Ror.*, 42(4), pp. 453-470.
- Ruiz-Lozano, J., 2003. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress. New perspectives for molecular studies. *Mycorrhiza*, Volume 13, p. 309–317.
- Sagna, M. B., Niang, K. S., Guisse, A. & Goffner, D., 2014. *Balanites aegyptiaca* (L.) Delile: geographical distribution and ethnobotanical knowledge by local populations in the Ferlo (north Senegal). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 18(4), pp. 503-511.
- Zomboudré, G. et al., 2005. Réponse physiologique et productivité des cultures dans un système agroforestier traditionnel : cas du maïs (*Zea mays* L.) associé au karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) dans la zone est du Burkina Faso. *Biotechnologie, Agronomie, Société, Environnement*, 9(1), p. 75–85.
- ADEME, 2015. Réintégrer l'arbre dans les systèmes agricoles pour diversifier la production et renforcer les écosystèmes. *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie Changement climatique - transition écologique, énergétique*, Issue 6, p. 12.
- Akiyama, K., Matsuzaki, K. & Hayashi, H., 2005. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi.. *Nature*, Issue 435, pp. 824 - 827.
- AKPO, L., 1998. *Effet de l'arbre sur la végétation herbacée dans quelques phytocénoses au Sénégal. Variation selon un gradient climatique*. Dakar: s.n.
- ALBERGEL, J. & Diop, S., 2012. innovants pour la gestion conservatoire des eaux et des sols sur le tracé de la Grande Muraille Verte. *La Grande Muraille Verte*, pp. 321-349.
- Anon., 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*, Washington: GreenFacts.
- Anon., 2017. *malijet*. [En ligne]
Available at: <http://malijet.com/>
- Aroca, R., Porcel, R. & Ruiz-Lozano, J., 2007. How does arbuscular mycorrhizal symbiosis regulate root hydraulic properties and plasma membrane aquaporins in *Phaseolus vulgaris* under drought, cold or salinity stresses?. *New Phytologist*, 173(4), p. 808–816.
- Auge, R., 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11(1), pp. 3-42.
- Bâ, A. t., 2012. Grande Muraille Verte : choix des espèces végétales. Dans: I. Editions, éd. *Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte Concepts et mise en oeuvre*. s.l.:s.n., p. 493.
- Badji, K., Ahmed, A. & Bayoumi, A., 1989. The forests of the Sudan. *University of Khartoum*, pp. 72-79.
- Barral, H. B. E. & B. G., 1983. *Systèmes de production d'élevage au Sénégal dans la région du Ferlo*. s.l.:Maisons-Alfort : GERDAT-IEMVT.

- Bationo, . A., Koala, . S. & Ayuk , E., 1998. Fertilité des sols pour la production céréalière en zone sahélo-soudanienne et valorisation des phosphates naturels. *Cahiers Agricultures*, 7(5), pp. 365-371.
- Bayala, J., Teklehaimanot, Z. & Ouedraogo, S., 2002. Production de mil sous des cimes d'arbres élagués dans un système de parc au Burkina Faso. *Agroforestry systems*, 54(3), pp. 203--214.
- Bentham, G., 1875. Revision of the Suborder Mimoseæ. *Transactions of the Linnean Society of London* , Issue 30, pp. 335-664.
- Béreau, . M., Louisanna, E., De Grandcourt, A. & Garbaye, J., 2003. Symbiose mycorhizienne et nutrition minérale. *Rev. For. Fr. LV*, Issue numéro spécial.
- Berhaut, J., 1975. *Flore illustrée du Sénégal: Dicotylédones*. dakar: Ministère de Developpement Rural et de l'Hydraulique Direction des Eaux et forêt.
- Besserer , A. et al., 2006. Strigolactones Stimulate Arbuscular Mycorrhizal Fungi by Activating Mitochondria. *PLoS Biol*, 7(4).
- Boubacar, A., 2006. *Effet du niveau d'élagage et de la distance du pied d'Acacia senegal (L.) Willd sur la production du mil Pennisetum glaucum (L.) R.Br. en station*, Niamey: s.n.
- Bouchenak-Khelladi , Y., Maurin , O., Hurter, J. & Vander der Bank, K., 2010. The evolutionary history and biogeography of Mimosoideae (Leguminosae): An emphasis on African acacias. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 57(2), p. 495–508.
- Brahim, A., Bechir, . A. B. & Mapongmetsem, P. M., 2016. Utilités socioéconomiques et culturelles du *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. (Famille Zygophyllaceae) chez les populations locales de la Région du Ouaddaï au Tchad. *Journal of Applied Biosciences*, Volume 111, pp. 10854-10866.
- Brown, G., Murphy, D., Miller, J. & Ladiges, P., 2008. *Acacia* s.s. and its relationship among tropical legumes, tribe Ingeae (Leguminosae: Mimosoideae). *Systematic Botany*, Issue 33, p. 739–751.
- Brundrett , M., 2009. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis. *Plant and Soil*, Issue 320, p. 37–77.
- Buck, L. E., Lassoie, J. P. & Fernandes, E. C., 1999. *Agroforestry in Sustainable Agricultural Systems*. Advances in Agroecology éd. Londres: CRC Press LLC.
- Buee , M. et al., 2000. The pre-symbiotic growth of arbuscular mycorrhizal fungi is induced by a branching factor partially purified from plant root exudates. *Molecular Plant-Microbe Interactions* , 6(13), p. 693–698..
- Calonne, M. et al., 2010. Propiconazole toxicity on the non-target organism, the arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus irregulare*. *Fungicides. InTech, Rijeka*, pp. 325-346.
- Campagnac , E. et al., 2010. Arbuscular mycorrhiza partially protect chicory roots against oxidative stress induced by two fungicides, fenpropimorph and fenhexamid. *Mycorrhiza*, 20(3), pp. 167-178.
- Cardoso, I. & Kuyper , T., 2006. Mycorrhizas and tropical soil fertility. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 116(1-2), pp. 72-84.
- Caris , C., Hawkins , W. & George , V., 1998. Studies of iron transport by arbuscular mycorrhizal hyphae from soil to peanut and sorghum plants. *Studies of iron transport by arbuscular mycorrhizal hyphae from soil to peanut and sorghum plants*, 8(1), pp. 35--39.

- Chapman, S., Langley, J., Hart, S. & Koch, G., 2006. Plants actively control nitrogen cycling: uncorking the microbial bottleneck. *New Phytologist*, Issue 169, p. 27–34.
- Chen, B. et al., 2003. The role of arbuscular mycorrhiza in zinc uptake by red clover growing in calcareous soil spiked with various quantities of zinc. *Chemosphere*, 50(6), pp. 839–846.
- Chiveu, C., Dangasuk, O., Omunyin, M. & Wachira, F., 2008. Genetic diversity in Kenyan populations of *Acacia senegal* (L.) willd revealed by combined RAPD and ISSR markers. *African Journal of Biotechnology*, 7(14), p. 2333–2340.
- Cisse, M. & Sarr, P., 2012. La mise en œuvre de la composante nationale Grande Muraille Verte du Sénégal : approches, réalisation et impact. Dans: *LE PROJET MAJEUR AFRICAINE DE LA GRANDE MURAILLE VERTE*. s.l.:Editions, IRD, pp. 321-329.
- Cissé, N., Thiaw, S., Ndiaye, M. & Hall, A., 1996. Guide de production de niébé. Sénégal: Institut de Recherches Agricoles (ISRA). pp. 1-12.
- Cissé, N., 2016. La culture traditionnelle du niébé au Sénégal. *AGRIDAPE*, Juin, Volume 32.2.
- Cissé, N. & Hall, A., 2003. [En ligne]
Available at: www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Publicat/cowpea_cisse/cowpea_cisse_e.htm
- Dalpe, Y., 2006. mycorhizes et bénéfices marginaux. *Quebec vert*, pp. 1-9.
- Dalpe, Y., 2005. Les mycorhizes : un outil de protection des plantes mais non une panacée. *PHYTOPROTECTION*, Issue 86, pp. 53-59.
- DAO, V., 1993. *Contribution à l'Etude de la Valorisation de Balanites Aegyptiaca en Zone Sahélienne : Le cas de Sollé dans le Yatenga*, OUAGADOUGOU: Université de Ouagadougou.
- De Barros, I., Gaiser, T., Lange, F. & Romheld, V., 2007. Mineral nutrition and water use patterns of a maize/cowpea intercrop on a highly acidic soil of the tropic semiarid. *Crops Research*, 101(3), pp. 26-36.
- Debiane, D. et al., 2008. In vitro evaluation of the oxidative stress and genotoxic potentials of anthracene on mycorrhizal chicory roots. *Environmental and experimental botany*, 64(2), pp. 120-127.
- Dickie, I. & Le Reich, P., 2005. Ectomycorrhizal fungal communities at forest edges. *J. Ecol.*, 93(2), p. 244–255.
- Dieng, O., Roucou, P. & Louvet, S., 2008. Variabilité intra-saisonnière des précipitations au Sénégal (1951-1996). *Sécheresse*, 19(2), pp. 87-93.
- DIOP, I., 2014. *Les champignons mycorhiziens arbusculaires indigènes associés au niébé (Vigna unguiculata (L.) Walp.) sur trois types de sols : Diversité et impact de l'inoculation sur la culture*, Dakar: UCAD.
- Dugje, I. et al., 2009. Production du niébé en Afrique de. p. 20.
- Duponnois, R. et al., 2007. Use of mycorrhizal inoculation to improve reforestation process with Australian *Acacia* in Sahelian ecozones. *ecol. eng.*, Issue 29, p. 105–1122.
- El Tahir, B. et al., 2009. Changes in soil properties following conversion of *Acacia senegal* plantation to other land management systems in North Kordofan State, Sudan. *Journal of Arid Environments*, 73(51), pp. 499-505.

- Faber, B. A., Zasoski, R. J., Burau, R. G. & Uriu, K., 1990. Zinc uptake by corn as affected by vesicular-arbuscular mycorrhizae. *Plant and Soil*, 129(2), pp. 121--130.
- Faris, D. G., 1965. The origin and evolution of the cultivated forms of vinga senensis. *Canadian Journal of Genetics and cytology*, 7(3), pp. 255-258.
- Ferrol, N. et al., 2009. Survival strategies of arbuscular mycorrhizal fungi in Cu-polluted environments. *Phytochemistry Reviews*, 8(3), pp. 551-559.
- Finlay , R., 2008. Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of Experimental Botany*, Issue 59, p. 1115–1126.
- Fortin, J., Plenchette , C. & Piché, . Y., 2008. Les mycorhizes. *la nouvelle révolution verte MultiMonde Quæ.(Eds.)*, p. 131.
- Freudenberger , M., 1988. Contradictions of gum arabic afforestation projects: observations from the Linguere Department of northern Senegal. *Bull Int.. Gmup Study Mimosoideae*, Issue 16, p. 87–122.
- Gaafar, A. et al., 2006. Improving the traditional Acacia senegal-crop system in Sudan: the effect of tree density on water use, gum production and crop yield. *Agrofor Syst* , Issue 66, p. 1–11.
- Gamalero, E. et al., 2004. Impact of two fluorescent pseudomonads and an arbuscular mycorrhizal fungus on tomato plant growth, root architecture and P acquisition. *Mycorrhiza*, Volume 14, pp. 185-192.
- Garbaye, J., 2013. *La symbiose mycorhizienne: Une association entre les plantes et les champignons*. 1ere édition éd. s.l.:Éditions Quæ.
- Genre , A. & Bonfante , P., 2007. Check-in procedures for plant cell entry by biotrophic microbes. *Molecular plant-microbes interactions*, 20(9), p. 1023–1030.
- Genre , A. et al., 2008. Prepenetration Apparatus Assembly Precedes and Predicts the Colonization Patterns of Arbuscular Mycorrhizal Fungi within the Root Cortex of Both Medicago truncatula and Daucus carota. *The Plant Cell*, Issue 20, p. 1407–1420.
- Genre , A. et al., 2005. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Elicit a Novel Intracellular Apparatus in Medicago truncatula Root Epidermal Cells before Infection. *The Plant Cell*, Issue 17, p. 3489–3499.
- Giffard, P., 1966. les gommiers: Acacia senegal Wild. Acacia laeta R.Br.. *Bois et Forêts des Tropiques* , Issue 105, pp. 21-32.
- Giffart, P., 1975. Les gommiers, essences de reboisement pour les zones sahaliennes. *Bois et Foêts des Tropiques*, Issue 161, pp. 3-20.
- Guissé, . A. et al., 2013. *Comptes Rendus Biologies*, 336(5-6), pp. 273-277.
- Hamadou, M. et al., 2017. Potentialités fourragères de mil (Pennisetum glaucum) (L.) R Br) : Revue de littérature. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 34(2), pp. 5424-5447.
- Hamel , D. & Plenchette, . C., 2007. *Mycorrhizae in Crop Production*. New York(street, Binghamton, NY): CRC Press.
- Hardie , K., 1985. The effect of removal of extraradical hyphae on water uptake by vesicular-arbuscular mycorrhizal plants. *New Phytol*, Volume 101, pp. 677-684.

- Harmand, J. & Balle, P., 2001. *La jachère agroforestière (arborée ou arbustive) en Afrique tropicale In : La jachère en Afrique tropicale : Rôles, aménagement, alternatives. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances.* Paris: John Libbey Eurotex.
- Hart, M., Reader, R. & Klironomos, J., 2003. Plant coexistence mediated by arbuscular mycorrhizal fungi. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(8), p. 418–423.
- Helgason, T. & Fitter, A., 2005. The ecology and evolution of the arbuscular mycorrhizal. *Fungi. Mycologist*, 19(3), pp. 96-101.
- Ismail, Y., McCormick, S. & Hijri, M., 2013. The arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus irregulare*, controls the mycotoxin production of *Fusarium sambucinum* in pathogenesis of potato. *FEMS microbiology letters*, 348(1), pp. 46--51.
- ISRA, 1998. *Rapport annuel 1997.*, Dakar: ISRA.
- Jamal, A., Ayub, N., Usman, M. & Khan, A. G., 2002. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance zinc and nickel uptake from contaminated soil by soybean and lentil. *International Journal of Phytoremediation*, 4(3), pp. 205--22.
- Kleinjan, C. & Hoffmann, J., 2013. Advances in clarifying the phylogenetic relationships of acacias: Relevance for biological control.. *Acta Oecol.*, Issue 48, p. 21–29.
- Koide, R., 1991. Nutrient supply, nutrient demand and plant response to mycorrhizal infection. *New phytologist*, 117(3), p. 365–386.
- Kosuta, S. et al., 2008. Differential and chaotic calcium signatures in the symbiosis signaling pathway of legumes. *Proceedings of National Academic of Sciences*, 28(105), pp. 9823-9828.
- Krüger, M. et al., 2012. Phylogenetic reference data for systematics and phylotaxonomy of arbuscular mycorrhizal fungi from phylum to species level. *New Phytologist*, Issue 193, p. 970–984.
- Kyalangalilwa, B., Boatwright, J., Daru, B. & Maurin, O., 2013. Phylogenetic position and revised classification of *Acacia* s.s. (Fabaceae: Mimosoideae) in Africa, including new combinations in *Vachellia* and *Senegalia*. *Bot. J. Linn. Soc.*, 172(4), p. 500–523.
- Larwanou, M., 2012. Espèces prioritaires et options agroforestières pour la mise en valeur de la Grande Muraille Verte. Dans: I. Editions, éd. *Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte Concepts et mise en oeuvre.* s.l.:s.n., p. 496.
- Le Coënt, P., Le Quellenec, S. & Ponce de Leon, I. A., 2001. *Perspectives d'adoption de l'agroforesterie dans le développement durable de l'Hérault : opportunités et obstacles à ce développement.* Montpellier: ENSAM.
- Le Houerou, H., 1980. The rangelands of the Sahel. *The rangelands of the Sahel*, Volume 33, p. 41–46.
- Lewington, M. & Maslin, B., 2009. Three new species of *Acacia* (Leguminosae: Mimosoideae) from the Kimberley Region, Western Australia.. *Nuytsia*, Issue 19, p. 63–75.
- Leyval, C., 2005. Effect of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on heavy metal and radionucleid transfer to plants. Dans: Elsevier, éd. *Biogeochemistry of trace elements in the rhizosphere.* s.l.:s.n., p. trace elements in the rhizosphere..
- Liagre, F. & Dupraz, C., 2008. L'agroforesterie. *Alter Agri*, Volume 91, pp. 10-13.

Liu, A. et al., 2002. Concentrations of K, Ca and Mg in maize colonized by arbuscular mycorrhizal fungi under field conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, 82(3), pp. 272--278.

Li, X.-L., George, E. & Marschner, H., 1991. Extension of the phosphorus depletion zone in VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil. *plante et sol*, 136(1), pp. 41--48.

Mallet, B. et al., 2002. *Quelles perspectives pour les gommiers en zone de savanes d'Afrique centrale?*. Garoua, Cameroun, s.n.

Maréchal, R., Mascherpa, J. & Stainier, . F., 1978. Etude taxonomique d'un groupe complexe d'espèces des genres Phaseolus et Vigna (Papilionaceae) sur la base des données morphologiques et polliniques, traitées par l'analyse informatique. *Boissiera*, Volume 28, pp. 1-273.

Maslin, B., Miller, J. & Seigler, D., 2003. Overview of the generic status of Acacia (Leguminosae: Mimosoideae). *Australian Systematic Botany*, Issue 16, pp. 1-18.

Matsuoka, K., 2012. An idea for the selection of species for the Great GreenWall; from the views of plant nutrition and a possible contribution of plant molecular biology. Dans: I. Editions, éd. *Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte Concepts et mise en oeuvre*. s.l.:s.n., p. 493.

MBAYE, M. et al., 2014. Date et densité optimales de semis du niébé [Vigna unguiculata (L.) Walp.] en association avec le mil [Pennisetum glaucum (L.) R. Br.]. *Journal of Applied Biosciences*, 76(1), p. 6305– 6315.

MICHON, . G., DE FORESTA, H. & LEVANG, P., 1995. Stratégies agroforestières paysannes et développement durable: les agroforêts à damar de Sumatra. *Natures Sciences Sociétés*, 3(3), pp. 207-221.

Morton, J. & Benny, G., 1990. Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (zygomycetes) : a new order, Glomales, two new suborders, Glomineae and Gigasporineae, and two new families, Acaulosporineae and Gigasporaceae with an emendation of Glomaceae. *Micotaxon*, Issue 37, pp. 471-491.

Murphy, D., 2008. A review of the classification of Acacia (Leguminosae, Mimosoideae).. *Muelleria*, Issue 26, p. 10–26.

Nair, P., 1993. *An introduction to agroforestr.* illustrée éd. s.l.:Kluwer Academic Publishers.

Ndiaye, M. & Gogo, B., 2006. *Interdépendances entre désertification, pauvreté, et les menaces sur la sécurité humaine*. Alger, s.n., p. 348.

Ndiaye, M., Cavalli, E., Manga, A. & Diop, T., 2011. Improved Acacia senegal growth after inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi under water deficiency conditions. *International Journal of Agriculture & Biology*, Issue 13, p. 271–274.

Ndoye, F., 2012. *Diversité des microorganismes sous Acacia senegal (L.) Willd. et impact des inoculations microbiennes sur la croissance et la productivité de la plante, et sur le biofonctionnement du sol*, Dakar: UCAD.

Nebhan, H., 2003. *Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne*. Rome: FAO.

Ngom, D., 2008. *Définition d'indicateurs de gestion durable des ressources sylvo-pastorales (Nord-Sénégal)*, Dakar: s.n.

- Ngom, D. et al., 2013. Caractéristiques écologiques du peuplement ligneux de la réserve de biosphère du Ferlo (Nord Sénégal). *Journal of Applied Biosciences*, Issue 65, pp. 5008-5023.
- Norman, J. & Hooker, J., 2000. Sporulation of *Phytophthora fragariae* shows greater stimulation by exudates of non-mycorrhizal than by mycorrhizal strawberry strawberry. *Mycologia*, Volume 104, pp. 1069-1073.
- Nouaim, R. & Chaussod, R., 1996. Rôle des mycorhizes dans l'alimentation hydrique et minérale des plantes, notamment des ligneux de zones arides. *Cahiers Options Méditerranéennes*, Volume 20, pp. 9-26.
- Oehl, F. et al., 2011. Advances in Glomeromycota taxonomy and classification. *IMA Fungus*, Issue 2, p. 191–199.
- Öpik, M., Moora, M., Liira, J. & Zobel, M., 2006. Composition of root-colonizing arbuscular mycorrhizal fungal communities in different ecosystems around the globe. *Journal of Ecology*, Issue 94, p. 778–790.
- Palm, C. & Szotta, L., 1996. Nutrient stocks in managed and natural humid tropical fallows. *Plant Soil*, Volume 186, pp. 293-309.
- Parniske, M., 2004. Molecular genetics of the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Curr. Opin. Plant Biol*, Issue 7, p. 414–421.
- Parniske, M., 2008. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature reviews /microbiology*, Issue 6, pp. 763-775.
- Pedley, L., 1978. A revision of *Acacia* Mill. in Queensland.. *Austrobaileya*, Issue 1, pp. 1-16.
- Pedley, L., 1986. Australian acacias: Taxonomy and Phytogeography. Dans: J. Turnbull, éd. *Australian acacias in developing countries*. ACIAR N°16 éd. s.l.:s.n., pp. 1-16.
- Perrot, E., 1944. *Matières usuelles du régime végétal*. Paris: Massion et Cie.
- Phillips, E., 1951. *The denera of South Africa flowering plants*. Pretoria: s.n.
- Plenchette, C., Fortin, J. & Furlan, V., 1983. Growth response of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility. In: Mycorrhizal dependency under field conditions. *Plant & Soil*, 70(2), p. 199–209.
- Plenchette, C., 2003. mycorhizes et nutrition phosphatée des plantes. *Mem. Acad. Natl. Art. Lett. Sci*, Issue 49, pp. 217-225.
- Plenchette, C., Clermont-Dauphin, C., Meynarde, J. & Fortin, J., 2005. Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 65(1), pp. 31–40.
- Porcel, R., Aroca, R. & Ruiz-Lozano, J., 2012. Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(2), pp. 181-200.
- Raman, N., Sahadevan, C. & Srinivasan, V., 2001. Growth of AM fungi on in vitro root organ culture of *Sorghum vulgare* and *Saccharum officinarum*. *Indian journal of experimental biology*, Volume 39, pp. 1293-1298.
- Redecker, E., Schüßler, A., Stockinger, H. & Stürmer, S., 2013. An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza*, 23(7), pp. 515 - 531.

- Rigou, L., 1994. *Influence de la mycorhization sur les conditions physico-chimiques du sol dans la rhizosphère. Conséquences sur la nutrition phosphatée de la plante-hôte*. Montpellier: Ecole nationale supérieure agronomique (Montpellier).
- Rillig, M., Wright, S. & Eviner, V., 2002. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant and Soil*, 238(2), p. 325–333.
- Rippsten, G. & Peyre de Fabregues, B., 1972. Modernisation de la zone pastorale du Niger.. *Etude agrostologique*, Issue 33, p. 306.
- Rodríguez, R. & Redman, R., 2008. More than 400 million years of evolution and some plants still can't make it on their own: plant stress tolerance via fungal symbiosis. *Journal of Experimental Botany*, 59(5), p. 109–1114.
- Ronse Decraene, L., De Laet, J. & Smets, E., 1996. Etudes morphologiques sur Zygothylaceae. II. Le développement floral et l'anatomie vasculaire de Peganum harmala. *Am. J. Bot*, 83(2), pp. 201-215.
- Saidou, A., Hassane, M., Abdoullatif, Y. & Karimou, A., 2018. Effets d'Acacia senegal (L.) Willd. sur le Rendement du Niébé (Vigna unguiculata) au Niger, Afrique de l'ouest. *European Scientific Journal*, 14(27).
- Sands, M. J., 2003. *Flora of tropical East Africa. Balanitaceae*. Royal Botanic Gardens, Kew éd. s.l.:s.n.
- Schroth, G. et al., 2004. *Agroforesterie et conservation de la biodiversité dans les paysages tropicaux*. illustrée éd. s.l.:Island Press.
- Schubler, A., Schwarzott, D. & Walker, C., 2001. A new fungal phylum, the Glomeromycota phylogeny and evolution. *Mycological Research*, Issue 105, pp. 1413-1421.
- Singh, B., Mohan Raj, D., Dashiell, K. & Jackai, L., 1997. *advances in Cowpea Research*. Abadan: s.n.
- Smith, S., Facelli, E. & Smith, F. A., 2010. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. *Plant soil*, 326(1-2), pp. 3-20.
- Smith, S. & Smith, F. A., 2012. Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth. *Mycologia*, 104(1), pp. 1--13.
- Smith, S. & Read, D., 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3 éd. s.l.:Academic Press.
- Soloviev, P., Niang, T., Gaye, A. & Totte, A., 2004. Variabilité des caractères physico-chimiques des fruits de trois espèces ligneuses de cueillette récoltés au Sénégal: Adansonia digitata, Balanites aegyptiaca et Tamarindus indica. *Fruits*, 59(2), pp. 109-119.
- Steele, W., 1976. cowpea. vigna unguiculata. Dans: N. Simmonds, éd. *Evolution of crop plants*. London: longmans, pp. 183-185.
- Strack, D. et al., 2003. Arbuscular mycorrhiza: Biological, chemical and molecular aspects. *Journal of Chemical Ecology*, 29(9), pp. 1955-1979.
- Summerfield, R. & Roberts, E., 1985. Vigna unguiculata. *Handbook of flowering*, Volume 1, pp. 171-184.
- Sy, O., 2010. Mobilité pastorale dans la Basse vallée du Ferlo dans le contexte de la remise en eau. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 63(249), pp. 31-46.

Sy, O., 2011. Dynamique de la trshanshumance et perspectives d'un développement intégré dans les régions agro-sylvo-pastorales du Ferlo (Sénégal). *Revue de Géographie du Laboratoire de Leïdi*, Issue 09, pp. 125-139.

Tanguay, L., 2014. les inoculants mycorrhiziens pour une agriculture québécoise plus productive et moins dépendante aux engrais minéraux phosphatés. p. 99.

Taylor, A. & Alexander, I., 2005. The ectomycorrhizal symbiosis. *mycologist*, 19(3), pp. 102-112.

Tedersoo, L., May, T. & Smith, M., 2010. Ectomycorrhizal lifestyle in fungi: global diversity, distribution and evolution of phylogenetic lineages. *Mycorrhiza*, Issue 20, p. 217–263.

Tisdall, J., 1991. Fungal hyphae and structural stability of soil. *Australian Journal of Soil Research*, Issue 29, pp. 729-743.

Torquebiau, E., Mary, F. & Sibelet, N., 2002. Les associations agroforestières et leurs multiples enjeux. *BOIS ET FORÊTS DES TROPIQUES*, 271(271), pp. 23-35.

Torquebiau, E., 2000. A renewed perspective on agroforestry concepts and classification Une vision renouvelée des concepts et de la classification de l'agroforesterie. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie*, 323(11), pp. 1009-1017.

Treseder, K. & Turner, K., 2007. Glomalin in ecosystems. *Soil Science Society of American Journal*, 74(4), p. 1257–1266.

UNESCO, 2012. *unesco.org*. [En ligne]

Available at: http://www.unesco.org/new/fr/member-states/single-view/news/a_new_biosphere_reserve_in_the_ferlo_region_in_senegal/
[Accès le 21 Octobre 2020].

Van Der Heijden, M. G. A., Moutoglis, P. & Klironomos, J., 1998. Mycorrhizal fungi diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, Issue 396, pp. 69-72.

Vassal, J., 1972. Apport des recherches ontogéniques et séminologiques à l'étude morphologique, anatomique et phylogénique du genre *Acacia*. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, Issue 108, pp. 125-247.

Vassal, J., 1998. *Les acacias au Sénégal: Taxonomie, écologie, principaux intérêts*. Paris, s.n., pp. 15-33.

Vassal, J., 1998. *Les acacias au Sénégal: Taxonomie, écologie, principaux intérêts*. Paris, s.n., pp. 15-33.

Verdcourt, B., 1970. Studies in the Leguminosae-Papilionoideae for the "Flora of Tropical East Africa": IV. *Kew Bulletin*, 24(507-569).

Von Maydell, L. J., 1990. *Arbres et arbustes du Sahel, leurs caractéristiques et leurs utilisations*. s.l.:Magraf.

Wakens, G., 1996. *Rôle des acacias dans l'économie rurale des régions sèches d'Afrique et du Proche-Orient*. Cahier FAO Conservation 27 éd. Rome: FAO.

Wright, S. & Upadhyaya, A., 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 198(1), p. 7–107.

ZIDA , W. A., 2009. *Etude de la régénération de Balanites aegyptiaca (L.) Del., Sclerocarya birras (A. Rich.) Hochst. et de Diospyros mespiliformis Hochst. ex A. Rich. dans la zone nord soudanienne du Burkina Faso*, Bobo Dioulasso: s.n.

ANNEXES

FICHE TECHNIQUE DE LA VARIETE MELAKH DU NIEBE

Description générale

Date d'obtention : **1989**

Date d'homologation :

Espèce : **Vigna unguiculata (L.) Walp.**

Synonyme : **Vigna sinensis (L.) Savi**

Pedigree : **IS86-292 x IT83s-742-13**

Nature génétique : **Lignée pure**

Obtenteur : **ISRA**

Lieu de sélection : **Bambey, Sénégal**

N° de sélection : **B 89-504**

Caractéristiques d'identification

✓ Caractéristiques de la plante

Pigmentation anthocyanique de la plante : **Absente**

Port : **Semi-rampant**

Croissance : **Indéterminé**

Hauteur de la tige principale (soutenue) :

Couleur des feuilles : **Vert foncé**

Cycle 50% floraison : **34 jas***

Couleur de la fleur : **Blanche**

Gousse (à maturité pour le marché du frais) :

- Longueur : **20 cm**

- Largeur : **2 cm**

- Torsion : **Absente**

- Pigmentation anthocyanique : **Absente**

- Nombre de gousse par pédoncule :

- Couleur : **Verte**

- Forme : **Longue**

✓ Caractéristiques de la graine

Poids de 100 graines : **17,5 gr.**

Longueur : **8,0 mm**

Forme : **Réniforme**

Couleur principale : **Blanc crème**

Présence de couleur secondaire : **Présente**

Distribution de la couleur secondaire : **Hile**

CARACTERISTIQUES AGRONOMIQUES et TECHNOLOGIQUES

Vocation culturale : **Culture irriguée ; pluviale (Fleuve Sénégal, Louga, Diourbel, Dépt. de Tivaouane)**

Cycle 95% maturité : **52 – 61 jas**

Cowpea (yellow) mosaic virus (CPMV) : **Présente**

Résistance au chancre bactérien : **Absente**

Résistance au striga : **Absente**

Résistance à Amsacta : **Absente**

Résistance aux pucerons : **Présente**

Résistance aux thrips : **Absente**

Résistance aux bruches : **Absente**

Rendement graines : **1,0 t/ha**

Rendement battage :

Rendement en fanes :

Questionnaire sur les Pratiques Agricoles dans la zone de Ranérou

Village :

Genre : homme ☐ femme ☐

Age :

Statut matrimonial : célibataire ☐ Marié (e) ☐ veuf/veuve ☐ divorcé(e) ☐

Groupe ethnique :

Date d'arrivée de la famille dans la zone :

Position GPS :

Pratiques de l'agriculture pluviale

A. Types de cultures, usages et surfaces exploitées :

1. Quelles plantes cultivez-vous, et à quelles fins?

Remplir le tableau de la plante la plus cultivée à la moins cultivée, scorer la ou les utilisations. Pour les usages rituels/cérémoniels et les dons, préciser.

	Plantes (nom)	Production annuelle moyenne (en kg, en sacs...)	Utilisation				
			Autocons.	Vente	Troc	Usage rituel (cérémonie, dote, etc)	Dons
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

2. Où ces plantes sont-elles cultivées?

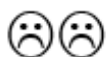
Pour chaque plante, sélectionner le lieu où elle est cultivée (garder les numéros du tableau précédent). Si plusieurs lieux, scorer du lieu favoris au lieu le moins utilisé.

Plante	Dans le campement	Contre le campement ou proche du campement (à portée de vue)	Loin du campement	Autre (à préciser)
1		1qs	2bf	
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

3. Les affirmations suivantes parlent de la qualité de l'emplacement des champs. Etes-vous d'accord ou non avec ces affirmations ?

Lire les phrases une par une, et demander si la personne n'est pas du tout d'accord (☹☹), pas trop d'accord (☹), plutôt d'accord (😊), très d'accord (😊😊).

Le bon endroit pour mettre un champ c'est près de mon habitation

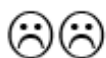

☐

☐

☐

☐

Le bon endroit pour mettre un champ c'est là où je peux le clôturer facilement

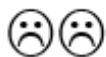

☐

☐

☐

☐

Le bon endroit pour mettre un champ c'est dans un bas fond

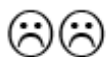

☐

☐

☐

☐

Le bon endroit pour mettre un champ c'est là où il y a quelques arbres


☐

☐

☐

☐

Est-ce qu'il y a selon vous un endroit encore meilleur que ceux proposés ci-dessus pour mettre un champ ?

.....

.....

.....

4. Pourriez –vous estimer la superficie totale que vous cultivez ?

Cochez la réponse correspondante

<1 ha ☐

<5ha ☐

>5ha ☐

5. Aimeriez-vous cultiver une plus grande surface ? Si oui expliquer ce qui vous limite.

.....

.....

.....

.....

6. Quelles sont les contraintes principales auxquelles vous faites face pendant la saison agricole ?

L'idée ici est d'amener par exemple la personne à exprimer les différentes choses qui font qu'il produit moins que ce qu'il pourrait produire

.....

.....

.....

.....

7. Outils et matériels agricole

Dans le tableau ci-dessous, pour chaque outil utilisé dans les champs, est-il possédé par la famille, emprunté à une autre famille, loué à une autre famille (si oui, combien ça coute). S'il est possédé, la famille le prête-t-il, le loue-t-il et combien.

Outil	Possédé (oui / non)	Emprunté (gratuit) (oui / non)	Loué (tarif ?) (oui / non)	Est-ce que lui/elle le prête ou le loue ? A qui et combien ? (oui / non)
« Ngoss ngoss »				
Houe (« daba »)				
Hilaire (« Djalo »)				
Charrue attelée (« machine »)				

Autre (à préciser)				
--------------------	--	--	--	--

8. Utilisez-vous des intrants ?

Si oui, lesquelles ?

- Pesticides ☐
 Herbicides ☐
 Fongicides ☐
 Engrais chimique ☐
 Fumier vache ☐
 Fumier mouton ☐
 Fumier chèvre ☐
 Fumier volaille ☐

9. Utilisation des résidus de culture

9.a. Quelles utilisations ?

Indiquer dans le tableau les usages, du plus important au moins important (ex : complément fourrage : 1 ; construction : 2 ; vente : 3)

Usage	Ordre d'importance
Complément de fourrage	
Vente	
Don	
Construction	
Trocs/échanges	
Vannerie	
Autre (à préciser)	

9.b. Les résidus de cultures qui servent de fourrage sont:

- ☐ Laissés dans les champs et n'importe quel animal peut les manger (y compris voisins, transhumants, etc.)
☐ Laissés dans les champs et seul les animaux de la famille le mangent
☐ Laissés dans les champs et seuls les animaux de la famille et des campements proches les mangent

☐ Récoltés et stockés au campement pour être consommés uniquement par les animaux familiaux

☐ Récoltés et stockés au campement et parfois partagés avec d'autres familles, ou vendus/troqués

10. Vous parents faisaient-ils de l'agriculture pluviale ? ☐ oui ☐ non

11. Vous grands- parents faisaient-ils de l'agriculture pluviale ? ☐ oui ☐ non

12. En plus de l'élevage, l'agriculture fait-il partie de votre identité culturelle (ex : le *pulaagu* si la personne est peule) ?

13. D'après vous, l'agriculture est :

14. Très valorisante ☐

Valorisante ☐

Peu valorisante ☐

Pas valorisante ☐

15. Souhaiteriez-vous qu'au moins un de vos enfants fassent de l'agriculture ?

☐ oui ☐ non

Pourquoi/justification.....
.....
.....
.....
.....
.....

16. Dans l'avenir, pensez-vous que l'agriculture dans le département va :

☐ Disparaître (plus personne ne fera d'agriculture)

☐ Diminuer (moins de familles feront de l'agriculture)

☐ Rester similaire (les familles qui en font vont continuer, celles qui n'en font pas ne vont pas s'y mettre)

☐ Augmenter (plus de familles vont faire de l'agriculture)

☐ Etre faite par tous

Commentaires.....
.....
.....
.....
.....

.....
.....
.....

Remercier la personne pour son temps et ses réponses, lui demander si il ou elle a des questions, et si tu pourras revenir à nouveau si jamais tu avais besoin de plus de précisions ou de renseignements.



Potentiel agroforestier en zone sylvopastorale du Ferlo et effet de *Vachelia senegal* Willd et *Balanites aegyptiaca* Del. sur la croissance, la mycorhization et le rendement du niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) dans la zone de Ranérou, Sénégal

HANE NALI, KANE A.^{1,2}, DIATTA S.^{1,2}, SANE S.¹, GOFFNER D.³, KAA A.³, PERROTTON A.³, NDIAYE C.¹

¹Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Biologie Végétale, BP 5005, Dakar, Sénégal ;

²Observatoire Homme-Milieu (OHM), c/o UMI 3189 ;

E-mail: hanendyemaguet@gmail.com



INTRODUCTION

L'agriculture pluviale est pratiquée dans la zone de Ranérou malgré sa vocation sylvopastorale. La Grande Muraille Verte avec un reboisement potentiel à grande échelle fait poser la question du potentiel agroforestier car au-delà des bénéfices directs des arbres (bois de chauffe, construction, fruits, fourrage etc.), les espèces agroforestières pourraient contribuer à maintenir ou restaurer la productivité agricole. Dans le présent travail, la variété Melakh sélectionnée par l'ISRA a été cultivée sous les deux espèces ligneuses *Vachelia senegal* et *Balanites aegyptiaca* à Ranérou (Sénégal). Les paramètres de croissance et de mycorhization ainsi que le rendement ont été évalués.

MÉTHODES

Zone d'étude

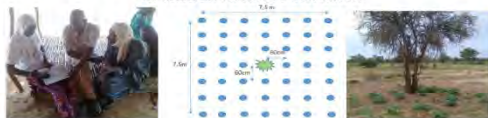
Parcelle expérimentale de l'UMI CNRS Environnement, Santé, Sociétés au département de Ranérou, de la région de Matam (Sénégal).

Matériel végétal

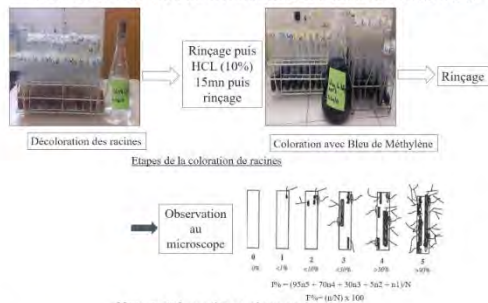
Niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) variété Melakh cultivé sur 51,81m² avec des écartements de 60X60cm sous *Balanites aegyptiaca* et sous *Vachelia senegal*.



• ENQUÊTES DE LA POPULATION LOCAL SUR LES PRATIQUES AGRICOLES ET MISE EN PLACE DU DISPOSITIF



• ÉVALUATION DU TAUX DE MYCORHIZATION DES RACINES DE NIÉBÉ



• DÉTERMINATION DU POTENTIEL INFECTION MYCORHIZOGÈNE



OBJECTIFS

Objectif général: améliorer la productivité des cultures annuelles dans le Ferlo par la valorisation des communautés microbiennes (champignons MA) associés aux espèces forestières

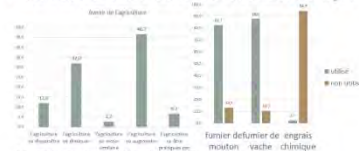
Objectif spécifique 1: étudier la perception et les connaissances des habitants de la zone de Ranérou sur les pratiques agricoles et leurs évolutions dans le temps

Objectif spécifique 2 : évaluation du taux de mycorhization du niébé associé à *Balanites aegyptiaca* et *Vachelia senegal*

Objectif spécifique 3 : évaluer effet de l'arbre sur la croissance du niébé, sa mycorhization et sa productivité

RÉSULTATS

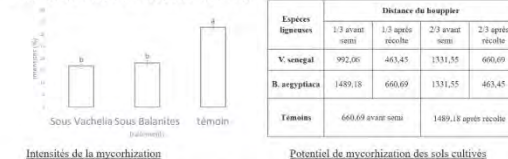
• SAVOIR-FAIRE ET PERCEPTION SUR LES PRATIQUES AGRICOLES



- Le niébé, une culture de l'autoconsommation au Ferlo
- Niébé, source de revenus

Perception par la population d'un avenir pour l'agriculture dans le département de Ranérou

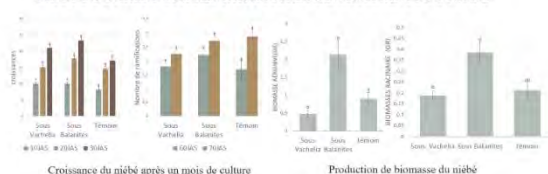
• PARAMETRES DE MYCORHIZATION



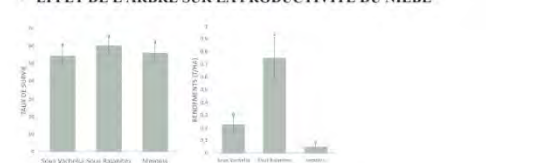
Intensités de la mycorhization

Potentiel de mycorhization des sols cultivés

• EFFET DE L'ARBRE SUR LES PARAMETRES DE CROISSANCE DU NIÉBÉ



• EFFET DE L'ARBRE SUR LA PRODUCTIVITE DU NIÉBÉ



Effet de l'arbre sur la productivité du niébé

CONCLUSION

- Pratique de l'agriculture en croissance dans la zone et utilisation presque exclusive des amendements organiques
- Potentiels infectieux mycorhizogènes des sols réduits après récolte du niébé sous *Balanites aegyptiaca* et sous *Vachelia senegal*
- Le niébé hors couvert a des fréquences et intensité de mycorhization plus élevées que sous couvert
- Croissance en hauteur du niébé significativement plus importante sous *Balanites aegyptiaca* comparativement au niébé sous *Vachelia* ou en hors couvert
- Production de biomasse et rendements plus importants sous *Balanites aegyptiaca* et plus faible sous *Vachelia senegal*