

UNIVERSITÉ GASTON BERGER DE SAINT LOUIS



*L'Excellence au Service
du Développement*

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIES

UFR DES SCIENCES AGRONOMIQUES, DE L'AQUACULTURE ET DES TECHNOLOGIES ALIMENTAIRES

THÈSE DE DOCTORAT

présentée par

MARIAMA DALANDA DIALLO

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Gaston Berger

Spécialité : Productions Végétales et Agronomie

Influence de cinq espèces ligneuses de la Grande Muraille verte au Ferlo (*Acacia senegal* (L.), *Acacia tortilis* var. *raddiana* (Savi) Brenan, *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir. et *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst) sur la minéralisation de l'azote, la biomasse microbienne et la diversité spécifique de la biomasse herbacée

Soutenue publiquement le 09 juillet 2016, devant le jury composé de :

Président :	M. Kandoura NOBA	Professeur Titulaire	UCAD (Dakar, Sénégal)
Rapporteurs :	M. Diégane DIOUF	Maître de Conférences	UCAD (Dakar, Sénégal)
	M. Papa Madiallacké DIÉDHIYOU	Maître de Conférences	UGB (Saint Louis, Sénégal)
	M. Saliou NDIAYE	Maître de Conférences	ENSA (Thiès, Sénégal)
Examineur :	M. Dominique MASSE	Directeur de Recherche	IRD (Montpellier, France)
	M. Aliou GUISSÉ	Professeur Titulaire	UCAD (Dakar, Sénégal)
	M. Aliou DIOP	Professeur Titulaire	UGB (Saint Louis, Sénégal)
.....			
Directeur :	M. Aliou GUISSÉ	Professeur Titulaire	UCAD (Dakar, Sénégal)
Co-directeur :	M. Aliou DIOP	Professeur Titulaire	UGB (Saint Louis, Sénégal)

Dédicace

« Pour les ambitieux qui veulent parvenir, l'habile patience est l'art de l'avenir »

Louis Belmontet, *Pensées, maximes et proverbes poétiques* (1861)

A ma fille Gracé Ndiaye

A mon père Mamadou Diallo

A ma mère Baïlaou Diallo

A feu nénan Mariama, que la terre lui soit légère

A néné Bineta et nénan Khotia

A toute la famille Diallo

Les personnes sans qui rien de tout ceci n'aurait été possible !

Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé à la Section Productions Végétales et Agronomie, UFR des Sciences Agronomiques, de l'Aquaculture et des Technologies Alimentaires (S2ATA) de l'Université Gaston Berger de Saint Louis. Au terme de ce travail, je tiens à remercier les autorités scientifiques et administratives de cette institution pour avoir mis à ma disposition tous les moyens techniques et humains pour le bon déroulement de cette étude.

Le travail de terrain a été réalisé sur les sites expérimentaux de Widou Thiengoly et la ferme agricole de l'Université Gaston Berger de Saint Louis. Je suis également reconnaissante envers l'Observatoire Hommes-Milieus international (OHMi) de Téssékéré, pour les projets accordés qui m'ont permis de réaliser les trois années de recherche doctorale.

Plusieurs personnes physiques et morales ont contribué au bon déroulement de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements :

- Au Pr Aliou Guissé, mon Directeur de Thèse, toujours là à me pousser en avant depuis le début en prenant garde que je ne me disperse, en m'aidant pour tout et le reste. Comment résumer autant de choses ? Alors je dis: "**MERCI!** Petit à petit, l'oiseau fait son nid, mais grâce aux amis, il construit même la nuit".

- Au Pr Aliou Diop, mon Co-Directeur de Thèse, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe sans ambages, pour avoir autant participé à l'élaboration de ce travail; pour sa disponibilité et son engagement, à nos discussions sur les traitements des données, et pour tout ce travail qui arrive à sa fin.

- Aux membres du comité de thèse, Pr Kandioura Noba, Pr Diégane Diouf, Pr Papa Madiallacké Diedhiou, Pr Saliou Ndiaye, Dr Dominique Masse, pour leurs conseils, leur disponibilité et pour avoir accepté de juger ce travail.

- Aux Dr Minda Mahamat-Saleh, Dr Papa Saliou Sarr, Dr Aly Diallo et Dr Ousmane Ndiaye, pour leur disponibilité et soutien indéfectible au cours de la collecte de données, la rédaction d'articles et leur amitié.

- A M. Jean-Luc Chotte, directeur de l'unité UMR Eco&Sols, pour m'avoir accueillie à Montpellier, ses conseils et sa rigueur scientifique.

- A mes collègues PER de l'UFR S2ATA : Dr Anicet Manga, Dr Farokh Niasse, Dr Moussa Ndong, Dr Amadou Bocar Bal, Dr César Bassène, Dr Justin Kantoussan, Dr Joseph Bassama,

M. Mouhamadou Amadou Ly, M. Lamine Diop, Dr Samba Racine Sow, Pr Papa Madiallacké Diédhiou, Dr Mateugue Diack, Dr Pape Sher Diop, Dr Mariama Sène Wade, Dr Saidou Nourou Sall, Dr Amadou Ndiaye, Mme Ngoné Fall Bèye Diakhaté, Dr Michel Bakar Diop, M. Robane Faye, pour leur amitié, leur conseil et leur soutien.

- A mes collègues PATS de l'UFR S2ATA : Mme Marie-Louise Badiane Diédhiou, Mme Fatou Binetou Gaye, Mme Khady Diop Ba, Mme Ndèye Fatou Ndiaye Fall, Mlle Fatou Diouf, Mlle Rokhaya Faye, Mme Jidah Fall, Mme Amy Sougou Lo, M. Thierno Khayar Kane, M. Mangaty Sakho, M. Djibril Sow, et M. Sy, pour leur sympathie à mon égard et leurs différents appuis au cours de cette thèse.

- Mon travail sur le terrain aurait été pénible sans l'aide des techniciens et des chauffeurs : M. Sidy Sidibé, M. François Diouf, M. Mamadou Sow, M. Serigne Ndiaye, M. Mbaye Diop et de l'équipe de l'OHMi : Mme Karine Ginoux et Mme Sophie Dramé.

- A M. Dominique Masse et M. Komi Assigbetsé, pour le soutien scientifique et la rédaction d'articles.

- A tous les techniciens du laboratoire IESOL : M. Lamine Dieng, M. Lamine Sagna, Mme Mariama Guèye, M. Mahécor Diouf, M. Amadou Diop dit Traoré, pour m'avoir aidé dans l'obtention des données d'analyses de laboratoire.

- A mes amies Bineta Diallo, Maïmouna Ndiaye, Rama Bah, Mada, Mounas, Sophia, pour leur amitié indéfectible.

- A M. Ibrahima Diallo, mon « grand » et beau-frère, qui a toujours cru en moi et qui m'a soutenu depuis toujours.

- A mes frères Woulin, Thierno Sadou, Tafsir, Madian, Lama, Sayfon, Alfa, Youssou, Adama, Sadiou, Bela, Abdoul, Amadou, Saliou, Woury et Moustapha.

A mes sœurs, Tima, Khali, Mounas, Diami, Khawa, Khadiatou, Oumou, Bineta et Fatimatou.

- A tous ceux qui de près ou de loin ont participé à cette étude, soyer en remerciés.



UNIVERSITE GASTON BERGER DE SAINT LOUIS
ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIES
UFR DES SCIENCES AGRONOMIQUES, DE L'AQUACULTURE ET DES
TECHNOLOGIES ALIMENTAIRES
THESE DE DOCTORAT
SPECIALITE : PRODUCTIONS VEGETALES ET AGRONOMIE

Nom et prénoms du candidat : Mariama Dalanda DIALLO

Titre de la thèse : Influence de cinq espèces ligneuses de la Grande Muraille verte au Ferlo (*Acacia senegal* (L.), *Acacia tortilis* var. *raddiana* (Savi) Brenan, *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir. et *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst) sur la minéralisation de l'azote, la biomasse microbienne et la diversité spécifique de la biomasse herbacée

Date et lieu de soutenance : le 09 juillet 2016 à l'UFR S2ATA, UGB

Jury :

Président :	M. Kandioura NOBA	Professeur Titulaire	UCAD (Dakar, Sénégal)
Rapporteurs :	M. Diégane DIOUF	Maître de Conférences	UCAD (Dakar, Sénégal)
	M. Papa Madiallacké DIÉDHIOU	Maître de Conférences	UGB (Saint Louis, Sénégal)
	M. Saliou NDIAYE	Maître de Conférences	ENSA (Thiès, Sénégal)
Examineur :	M. Dominique MASSE	Directeur de Recherche	IRD (Montpellier, France)
	M. Aliou GUISSÉ	Professeur Titulaire	UCAD (Dakar, Sénégal)
	M. Aliou DIOP	Professeur Titulaire	UGB (Saint Louis, Sénégal)
.....			
Directeur :	M. Aliou GUISSÉ	Professeur Titulaire	UCAD (Dakar, Sénégal)
Co-directeur :	M. Aliou DIOP	Professeur Titulaire	UGB (Saint Louis, Sénégal)

Résumé

L'objectif de cette étude est de caractériser la variabilité de la phénologie de cinq espèces ligneuses, *Acacia senegal* (L.) Willd., *Acacia tortilis* var. *raddiana* (Savi) Brenan, *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir., et *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst., et leur influence sur la minéralisation de l'azote, la biomasse microbienne et la diversité floristique des herbacées dans le Nord Ferlo, Sénégal. Les cinq espèces ligneuses ont été choisies parmi les essences retenues pour la restauration des écosystèmes sahéliens dans le cadre du projet de reforestation panafricaine de la Grande Muraille Verte.

L'expérimentation a été réalisée à Widou situé au Nord du Sénégal. Le suivi de la phénologie (feuillaison, floraison et fructification) a été effectué par des observations qualitatives et des mesures quantitatives. La teneur du sol en azote minéral ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ et $\text{NO}_3^-\text{-N}$) et la biomasse microbienne ont été déterminées hors et sous-houppiers des arbres durant 9 mois. La collecte des litières a été effectuée pendant un an sous-couvert des arbres et l'étude de la perte de masse des litières a été suivie durant 16 mois. Pour les mesures de la biomasse herbacée, nous avons procédé à un inventaire des espèces herbacées sous-couvert et hors-couvert des plantes ligneuses. Une analyse floristique qualitative (familles, genres et espèces) a été réalisée à partir de la liste floristique des différents inventaires couplée à une approche quantitative utilisant le

coefficient de similitude de Sørensen (1948). Les résultats ont montré qu'il y a une variabilité interspécifique et intraspécifique de la phénologie des espèces. La concentration en azote minéral ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ et $\text{NO}_3^-\text{-N}$), la biomasse microbienne, la biomasse herbacée, la perte de masse et la chute de litière varient selon les traitements. Les concentrations en azote minéral les plus élevées ont été observées chez *B. senegalensis* en octobre 2015 ($53,90 \mu\text{g N g}^{-1}$ sol) et *B. aegyptiaca* ($45,32 \mu\text{g N g}^{-1}$ sol) en août 2014 à $P \leq 0,05$ tandis que la biomasse microbienne la plus élevée a été notée chez *B. aegyptiaca* ($53,67 \text{ mg C kg}^{-1}$ sol) en octobre 2014 et chez l'*A. senegal* (49 mg C kg^{-1} sol) en janvier 2015. Les quantités de litières sous *B. senegalensis* ($39,3 \text{ t ha}^{-1}$) étaient significativement plus élevées que celles des autres espèces ligneuses ($P \leq 0,05$). Le pourcentage de perte de masse des litières le plus élevé a été noté chez l'*A. tortilis* var. *raddiana* (70%) et les plus faibles chez *S. birrea* (44%) et *B. aegyptiaca* (52%). Les résultats de l'inventaire floristique ont permis de dénombrer 29 espèces végétales herbacées qui se répartissent entre 25 genres et 15 familles. Les espèces ligneuses comme *B. senegalensis*, *B. aegyptiaca* et *S. birrea* possèdent la flore la plus riche avec 18 espèces chacune, alors que *A. tortilis* var. *raddiana* et *A. senegal* ont respectivement 12 et 9 espèces. Le témoin est le moins diversifié avec 6 espèces herbacées.

Les résultats de cette étude montrent que l'implantation de la GMV dans la zone semi-aride du Ferlo, permet de réhabiliter les sols dégradés en améliorant la disponibilité des éléments nutritifs notamment l'azote minéral et la diversité de la végétation herbacée.

Mots-clés: Phénologie, Décomposition, Minéralisation N, Biomasse herbacées, Diversité floristique, Interaction arbre - herbe, Grande muraille verte, Ferlo, Sénégal.

Influence of five woody species of the Great Green Wall in Ferlo (*Acacia senegal* (L.), *Acacia tortilis* var. *raddiana* (Savi) Brenan, *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir. and *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst) on nitrogen mineralization, microbial biomass and specific diversity of the herbaceous biomass

Abstract

The study was carried out for two main objectives. The primary purpose was to characterize the variability of the phenophases for five woody species, *Acacia senegal* (L.) Willd, *Acacia tortilis* var. *raddiana* (Savi) Brenan, *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir., and *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst.

The second objective was to follow the fall and decomposition of litters of the species, and to assess their influence on nitrogen mineralization, microbial biomass and specific diversity of herbaceous plants in the North Ferlo, Senegal. The five tree species were selected from the species chosen for restoration of Sahelian ecosystems in the Pan African reforestation project of the Great Green Wall.

The experimentation was conducted in Widou in northern Senegal. The measures of the phenology (foliation, flowering and fructification) were carried out for qualitative and quantitative observations. The soil content in mineral nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$) and the microbial biomass were determined off and under tree canopies for 9 months. The follow up of litter fall was carried out for one year under tree-canopy and the study on litter decomposition was done for 16 months. For the measures of the herbaceous biomass, we inventoried the plant species under- and off-canopy of the woody plants. A qualitative floristic analysis (families, genera, and species) was realized from the floristic list of the different inventories, combined with an quantitative approach using the similitude coefficient of Sorensen (1948). The results of the phenology of the woody species have shown interspecies and intraspecies variability. The concentration in mineral nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$), microbial biomass, herbaceous biomass, litter loss depending on treatments. The highest concentrations of N were observed in *B. senegalensis* on October 2015 ($53.90 \mu\text{g N g}^{-1}$ soil) and *B. aegyptiaca* ($45.32 \mu\text{g N g}^{-1}$ soil) on August 2014 at $P \leq 0.05$ while the highest biomass was observed in *B. aegyptiaca* ($53.67 \text{ mg C kg}^{-1}$ soil) on October 2014 and *A. senegal* (49 mg C kg^{-1} soil) on January 2015. The quantities of litters under *B. senegalensis* (39.3 t ha^{-1}) were significantly higher than that of the other woody species ($P \leq 0.05$). The highest percentage of litter mass loss was observed in *A. tortilis* var. *raddiana* (70%) and the lowest percentage was obtained in *S. birrea* (44%) and *B. aegyptiaca* (52%). The results of floristic inventory revealed the presence of 28 herbaceous plant species distributed in 25 genera and 15 families. The woody species such as *B. senegalensis*, *B. aegyptiaca* and *S. birrea* possess the richest flora with 18 species for each one of them, while *A. tortilis* var. *raddiana* and *A. senegal* have 12 and 9 species, respectively. The control sample is the less diversified with only 6 herbaceous species.

The results of this study show that implantation of GMV in the semi-arid region of Ferlo, allows to rehabilitate degraded soils by improving the availability of nutrients in particular mineral nitrogen and diversity of herbaceous vegetation.

Key words: Phenology, Decomposition, N mineralization, Herbaceous biomass, Floristic diversity, Tree-weed interaction, Great Green Wall, Ferlo, Senegal.

Liste des acronymes

% : Pourcent

& : et

°C : Degré Celsius

ADL : Acid Detergent Lignin

ADS : Acid Detergent Solution

AFC : Analyse Factorielle de Correspondance

cm : Centimètre

ENSA: Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture

ETP : Evapotranspiration Potentielle

FAO : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)

FST : Faculté des Sciences et Techniques

g : Gramme

GMV : Grande Muraille Verte

ha : Hectare

IBGE : Institut Bruxellois de Gestion de l'Environnement

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

KCl 1N : Chlorure de Potassium 1 Normalité

km² : Kilomètre carré

LSD : Least Significant Difference

m : Mètre

min : minute

ml : Millilitre

mm : Millimètre

MS : Matière sèche

n : Nombre de répétition

NDS : Neutral Detergent Solution

P : Précipitation

PPZS : Pôle Pastoral Zones sèches

SIFOR : système d'information Forestier du Mali

T : Température

t : Temps

UCAD : Université Cheikh Anta Diop de Dakar

UFR: Unité de Formation et de Recherche

UGB: Université Gaston Berger

UMR : Unité Mixte de Recherche

S2ATA: Sciences Agronomiques, Aquaculture et Technologies Alimentaires

SAT: Sciences Appliquées et Technologie

µg : Microgramme

µl : Microlitre

µm : Micromètre

Liste des figures

Figure 1. Représentation schématique simplifiée des axes de recherche de la thèse

Figure 2. Carte de situation du Ferlo

Figure 3. Tracé régional de la Grande Muraille Verte

Figure 4. Situation géographique de la zone d'étude

Figure 5. Variation de la phase végétative des espèces ligneuses

Figure 6. Variation de la phase de floraison des espèces ligneuses

Figure 7. Variation de la phase de fructification des espèces ligneuses

Figure 8. Apport annuel de litières (feuilles, brindilles, fleurs et fruits) par les différentes espèces ligneuses (t MS/ha)

Figure 9. Décomposition des litières au cours du temps

Figure 10. Biomasse des herbacées

Figure 11. Biomasse microbienne (A) et biomasse microbienne après un mois d'incubation (B)

Figure 12. Analyse en Composantes Principales (ACP) entre les espèces ligneuses, la biomasse microbienne and et l'azote minéral du sol (NH_4^+ et NO_3^-). Ase: *Acacia senegal* ; Atr: *Acacia tortilis raddiana* ; Bae: *Balanites aegyptiaca* ; Bse: *Boscia senegalensis* ; Str: *Scerocarya birrea* ; Con: témoin

Figure 13. Diagramme des relevés et des espèces herbacées sur le plan factoriel (F1 et F2)

Figure 14. Variation de la fréquence de présence (%) des différentes espèces herbacées recensées

Liste des tableaux

Tableau 1. Description botanique de l'*A. senegal*

Tableau 2. Description botanique de l'*A. tortilis var. raddiana*

Tableau 3. Description botanique de *B. aegyptiaca*

Tableau 4. Description botanique de *B. senegalensis*

Tableau 5. Description botanique de *S. birrea*

Tableau 6. Variations des facteurs climatiques dans la zone d'étude entre 2014 et 2015

Tableau 7. Liste des espèces ligneuses choisies

Tableau 8. Caractéristiques biochimiques des litières des espèces ligneuses

Tableau 9. Phénophases, stades et caractéristiques correspondantes reconnues pour le suivi phénologique des espèces végétales

Tableau 10. Cotation des stades phénologiques correspondant aux fréquences

Tableau 11. Evolution des stades phénologiques des espèces ligneuses au cours du temps (n=10 individus)

Tableau 12. Coefficient de Régression (valeurs de R) entre les caractéristiques biochimiques des litières et la décomposition au cours du temps

Tableau 13. Azote minéral ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ et $\text{NO}_3^-\text{-N}$) ($\mu\text{g N g}^{-1}$ sol) sous et hors-couvert des arbres

Tableau 14. Azote minéral net ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ et $\text{NO}_3^-\text{-N}$) ($\mu\text{g N g}^{-1}$ sol)

Table 15. Coefficient de régression (valeurs de R) entre les caractéristiques biochimiques des litières, l'azote minéral, l'azote minéral net, la biomasse microbienne et la biomasse microbienne après incubation

Tableau 16. Valeurs propres et pourcentage d'inertie des quatre premiers axes de l'AFC

Tableau 17. Liste des espèces herbacées inventoriées sous les houppiers des arbres

Tableau 18. Indice de similitude de Sorensen (1948) entre les différents relevés des espèces ligneuses

Liste des photos

Photo 1. *Acacia senegal* (A-gousses, B-tronc, C-feuilles et fleurs)

Photo 2. *Acacia tortilis var. raddiana* (A-feuilles et fleurs, B-tronc et C-gousses)

Photo 3. *Balanites aegyptiaca* (A-fruits et feuilles, B- tronc, C-feuilles, fruits et fleurs)

Photo 4. *Boscia senegalensis* (A-feuilles et fleurs, B-tronc, C- fruits)

Photo 5. *Sclerocarya birrea* (A-feuilles, B-fleurs, C-fruits, D- écorce)

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract.....	iv
Liste des acronymes	v
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des photos	viii
Introduction générale	1
Chapitre I: Synthèse bibliographique	6
1.1. Présentation générale du Ferlo	7
1.1.1. Climat	7
1.1.2. Sols et Géomorphologie	8
1.1.3. Hydrologie	9
1.1.4. Végétation	10
1.1.5. Population et élevage	10
1.2. La Grande Muraille Verte (GMV).....	11
1.2.1. Contexte de la Grande Muraille verte	11
1.2.2. Mise en place de la Grande Muraille Verte	12
1.3. Influence des espèces ligneuses sur les modalités de décomposition de leur litière	13
1.4. Influence des espèces ligneuses sur la biotransformation de l'azote dans le sol.....	14
1.5. Influence des espèces ligneuses sur la biomasse de la végétation herbacée	16
1.6. Description botanique de quelques plantes ligneuses du Ferlo	17
1.6.1. <i>Acacia senegal</i> (L.) Willd.	17
1.6.2. <i>Acacia tortilis</i> var. <i>raddiana</i> (Savi) Brenan.....	20
1.6.3. <i>Balanites aegyptiaca</i> (L.) Del.	22
1.6.4. <i>Boscia senegalensis</i> (Pers) Lam. Ex Poir.....	24
1.6.5. <i>Sclerocarya birrea</i> (A. Rich.) Hochst.	26
Chapitre II: Matériels et Méthodes	30
2.1. Le site.....	31
2.2. Choix des plantes ligneuses	32
2.3. Dispositifs expérimentaux	34
2.3.1. Phénologie des espèces ligneuses	34

2.3.2. La collecte des litières et le suivi de la décomposition	36
2.3.3. Biomasse herbacée	37
2.3.4. Etude de la minéralisation de l'azote et de la biomasse microbienne	38
2.3.5. Effet des espèces ligneuses sur la diversité des herbacées	39
2.4. Analyses.....	40
2.4.1. Extraction de l'azote minéral	40
2.4.2. Dosage de la biomasse microbienne totale	40
2.4.3. Dosage colorimétrique de l'ammonium	41
2.4.4. Dosage colorimétrique du nitrate	41
2.4.5. Analyse statistique.....	42
Chapitre III: Résultats.....	43
3.1. Caractérisation de la variabilité des Phénophases des cinq espèces ligneuses	44
3.1.1. Variation intraspécifique de la phénologie des espèces ligneuses	44
3.1.2. Variations interspécifique de la phénologie des espèces ligneuses.....	47
3.1.3. Quantification des stades phénologiques des espèces ligneuses .. Erreur ! Le signet n'est pas défini.	
3.2. Chute et décomposition de la litière des cinq espèces ligneuses et leur influence sur la biomasse herbacée	50
3.2.1. La collecte des litières	50
3.2.2. Pourcentage de perte de masse des litières.....	51
3.2.3. Caractérisation de la biomasse herbacée	52
3.3. Influence des espèces ligneuses sur la minéralisation de l'azote et la biomasse microbienne	54
3.3.1. Dynamique de l'azote minéral	54
3.3.2. Minéralisation nette de l'azote organique du sol	54
3.3.3. Biomasse microbienne	57
3.3.4. Analyse en Composante Principal (PCA)	59
3.3.5. Coefficient de Régression	60
3.4. Influence des espèces ligneuses sur la diversité floristique des herbacées.....	62
3.4.1. Analyse factorielle des correspondances (AFC)	62
3.4.2. Inventaire floristique	64
3.4.3. Indice de diversité	65
3.4.4. Fréquence de présence	66
Chapitre IV: Discussion générale	67
4.1. Variabilité des Phénophases	68
4.2. Les collectes des litières	69

4.3. Décomposition des litières	70
4.4. Biomasse des herbacées	71
4.5. Azote minéral dans le sol.....	71
4.6. La minéralisation nette de l'azote organique du sol	72
4.7. La biomasse microbienne	73
4.8. Diversité floristique des herbacées	74
Conclusion et perspectives	76
Références bibliographiques	78
Annexes	93

Introduction générale

La zone sahélienne dominée par des steppes et des savanes arbustives, a connu, au cours des dernières décennies, une nette réduction de son potentiel, de sa productivité et de sa diversité (Ndiaye *et al.*, 2014 ; Ngaryo *et al.*, 2010). Entre 1971 et 1990, les déficits pluviométriques se sont traduits par un glissement progressif des isohyètes du Nord vers le sud sur plus de 120 km. Consécutivement à ce phénomène de sécheresse, des processus de désertification se sont révélés (Janicot & Fontaine, 1993). Ces derniers ont été accentués par des activités pastorales croissantes engendrant une forte pression sur la strate herbacée mais également arborée du fait des pratiques d'élagage par les éleveurs (Garrity *et al.*, 2010). En outre, la récurrence et l'intensité des feux de brousse ont beaucoup contribué à la dégradation de cet écosystème (Niang *et al.*, 2014). Tous ces facteurs ont contribué à la dégradation des ressources naturelles dans ces systèmes sylvo-pastoraux augmentant le niveau de pauvreté et de vulnérabilité des populations.

Pour faire face à ces contraintes, les pays du Sahel ont initié une stratégie pour lutter contre la désertification et réhabiliter les sols dégradés (Guissé *et al.*, 2013). La Grande Muraille verte (GMV), initiée en Juillet 2005, a pour ambition de réduire les effets de la désertification par une approche de développement intégré et de restaurer les écosystèmes du sahel le long d'une bande de 15 km de large à travers 11 pays africains (Dia & Duponnois, 2012). Le rôle de l'arbre dans cet écosystème est prépondérant. En plus de représenter de l'ombrage et des aires de repos pour les animaux, il sert aussi comme aliments aux animaux en cas de disparition du couvert végétal de la strate herbacée pendant la saison sèche et à une influence positive sur la fertilité du sol (Weltzin & Coughenour, 1990; Abdou *et al.*, 2013). Il s'agit dans ce projet de favoriser le développement de la strate arborée par l'introduction de plusieurs espèces ligneuses sur les parties les plus affectées par la désertification, entre les isohyètes 200 et 400 mm. Dans une démarche écologique, il est proposé de s'inspirer du fonctionnement des savanes, en mettant l'accent sur des arbres indigènes présents naturellement dans ces régions. Ceci passe par une meilleure connaissance du rôle de ces espèces ligneuses dans le fonctionnement du système sol-plante. Les arbres ayant une incidence directe sur la conservation et la valorisation de la biodiversité floristique, la restauration et la conservation des sols (Duponnois *et al.*, 2005 ; Niang *et al.*, 2014).

Les arbres jouent un rôle important dans l'augmentation de la productivité d'un site, à travers les changements écologiques et physico-chimiques qu'ils induisent dans le sol (Singh *et al.*,

2002). En zone semi-aride, où les pluies sont faibles et irrégulières, les températures de l'air et du sol élevées, les arbres fournissent une protection et une amélioration biologique du milieu, un abri aux plantes herbacées qui poussent sous leur couvert mais surtout des produits de bois de chauffe et de services aux populations environnantes (Diallo *et al.*, 2015a). Outre les processus biogéochimiques qui se passent dans la zone rhizosphérique, l'autre processus d'interactions entre sols et arbres se situe au niveau de l'interface entre litières, principalement les feuilles sénescentes et le sol. L'action de ces litières sur le sol est surtout notée au niveau de l'amélioration de ses propriétés physique et chimique, ainsi que dans l'alimentation des plantes en augmentant la disponibilité de l'eau sous les houppiers (Chambers, 2001). Elles augmentent aussi la diversité spécifique (Diallo *et al.*, 2015a) en fournissant à la aux espèces herbacées un microclimat, assurant ainsi la protection du sol des radiations directes et des hautes températures (Lopez-Pintor *et al.*, 2000). L'effet positif des arbres sur la structure de la communauté microbienne et sur la fertilité des sols et les cultures a été démontré par plusieurs auteurs (Hamilton *et al.*, 2001 ; Tian *et al.*, 2007). Les litières des espèces végétales constituent une source d'azote minéral (NO_3^- -N et NH_4^+ -N) qui provient de la dégradation, principalement biologique, des différentes matières organiques (MO) des espèces implantées dans cette zone. (Diallo *et al.*, 2005 ; 2006 ; 2015b). Au cours de décomposition de la litière, les nutriments sont soit libérés (minéralisés) ou immobilisés à la suite des activités de microflore et la microfaune du sol, en fonction de la composition chimique des résidus; comme le rapport C/N, la concentrations en lignine, cellulose et polyphénols contribuant ainsi au cycle des éléments nutritifs et de carbone (Recous *et al.*, 1995, Diallo *et al.*, 2005 ; 2015b). Cet azote, principal élément de la nutrition végétale, n'est assimilé que sous une forme minérale surtout le nitrate (Hart *et al.*, 1994). Ces transformations sont assurées par un ensemble de bactéries chimolithotrophes telles que les *Nitrobactériaceae* dont les espèces les plus communes sont *Nitrosomonas europaea* qui intervient dans la transformation de l'ammonium en nitrite (Koops *et al.*, 2003) et *Nitrobacter winogradskyi* dans l'oxydation du nitrite en nitrate (Kowalchuck *et al.*, 2000).

Objectifs

L'objectif général de ce travail est de promouvoir les systèmes agrosylvopastoraux comme moyen d'améliorer la fertilité des sols et de lutter contre l'insécurité alimentaire.

Les objectifs spécifiques sont de suivre les effets de cinq espèces ligneuses, à savoir, *Acacia senegal* (L.) Willd, *Acacia tortilis* var. *raddiana* (Savi) Brenan, *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir., et *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst. :

- (i) sur la disponibilité de l'azote minéral dans le sol ;
- (ii) la biomasse microbienne ; et
- (iii) la diversité floristique des herbacées.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs hypothèses ont été émises.

Hypothèses de recherche

Les quatre hypothèses suivantes ont soutenues nos recherches:

- H1 : la phénologie des espèces ligneuses dépend des conditions environnementales (température et pluviométrie).
- H2 : en milieu réel, la disponibilité de l'azote dans le sol dépend de la qualité des apports et des conditions environnementales (température et pluviométrie).
- H3 : la décomposition de la matière organique dépend de leur qualité biochimique.
- H4 : la production et la diversité du couvert végétal herbacée dépend du type d'arbre.

Nous nous sommes attachés dans cette thèse, suivant une approche écologique axée sur le fonctionnement global de l'écosystème, à suivre les interactions entre les strates ligneuses et herbacées, les sols et les organismes qui y vivent. Les processus écologiques déterminés par les arbres sont le principal objet de ce travail. Les processus étudiés impliquent les micro-organismes du sol et le couvert végétal herbacé qui est un déterminant majeur de l'action des arbres sur le sol.

Nous avons axé notre recherche en prenant en compte (Figure 1) :

- (i) le couvert végétal arboré, *via* sa phénologie et ses caractéristiques de production;
- (ii) le sol, *via* sa composante microbienne qui conditionne le cycle des nutriments en particulier le cycle de l'azote, et influence la décomposition de la matière organique exogène;
- (iii) le couvert végétal herbacé en termes de production et de diversité.

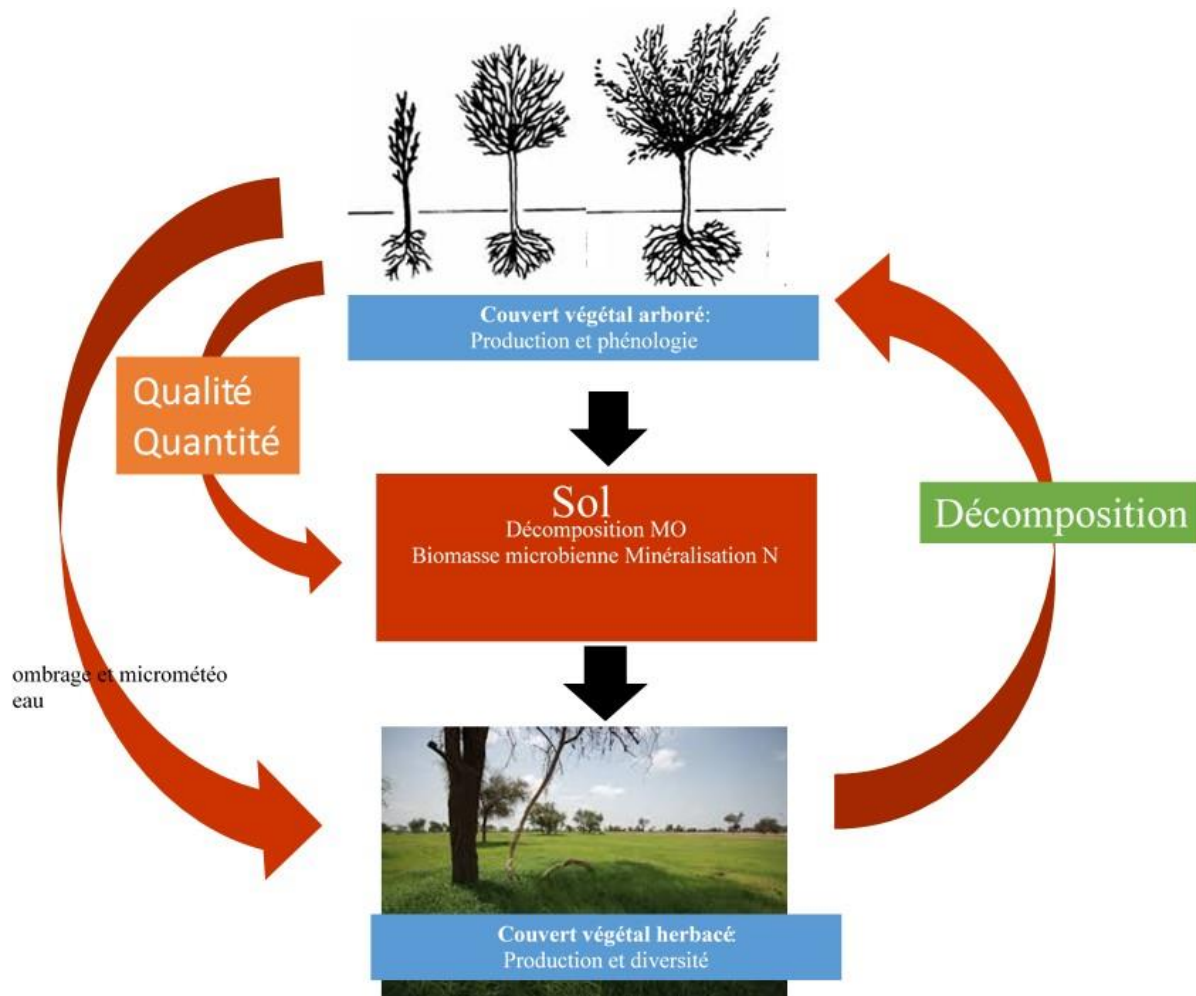


Figure 1. Représentation schématique simplifiée des axes de recherche de la thèse

Ce travail de thèse se propose d'étudier l'influence de différents types d'arbres sur la disponibilité de l'azote minéral dans le sol, la biomasse microbienne et la diversité floristique des herbacées dans le Nord Ferlo du Sénégal. Il s'agit de démontrer l'influence que peut induire la présence des arbres dans un milieu donné, sur les microorganismes du sol, la minéralisation de l'azote et la croissance végétale. Nous suivons en même temps la décomposition de leur litière ainsi que la quantification de leur apport annuel en biomasse

Plan de la thèse

Ce travail de thèse comprend quatre parties.

La première partie est consacrée à la revue bibliographique qui montre d'une part le Ferlo et la Grande Muraille Verte (GMV), d'autre part en quoi les arbres influencent la fertilité des sols et la diversité spécifique des herbacées.

La démarche méthodologique adoptée est ensuite présentée dans la deuxième partie. Nous avons présenté d'abord le site d'étude, les matériels utilisés ainsi que les protocoles expérimentaux, en terminant par les analyses.

Dans la troisième partie, nous présentons les différents résultats de cette étude.

Dans la quatrième et dernière partie, les différents résultats obtenus sont synthétisés et discutés.

Enfin, des conclusions sont tirées puis des perspectives d'études sont dégagées de ce travail.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1.1. Présentation générale du Ferlo

La région du Ferlo correspond à la partie septentrionale du Sénégal (Sy, 2009). Elle est limitée au Sud par les frontières méridionales des départements de Linguère et Ranérou Ferlo, à l'ouest par les limites occidentales des communautés rurales de Sagatta-Djolof, Keur Momar Sarr et Mbane, au nord et à l'est par la vallée alluviale du fleuve Sénégal (Figure 2). Elle doit son nom à un petit cours d'eau, le Ferlo (Coundoul, 2011). Le Ferlo a été nommé en 1951 par les autorités coloniales « zone Sylvopastorale » (Diop *et al.*, 2004).

La zone éco géographique du Ferlo présente deux grandes parties. La zone Sylvopastorale qui se situe à l'Ouest du Ferlo et qui couvre une superficie de 45 000 km² environ, dont 2000 km² pour la partie pastorale Ouest, où subsistent encore quelques cultures vivrières (le mil et le niébé notamment) et l'autre zone couvrant 43 000 km² concerne la partie du Ferlo essentiellement Sylvopastorale (LEAD/ PPZS, 2005).

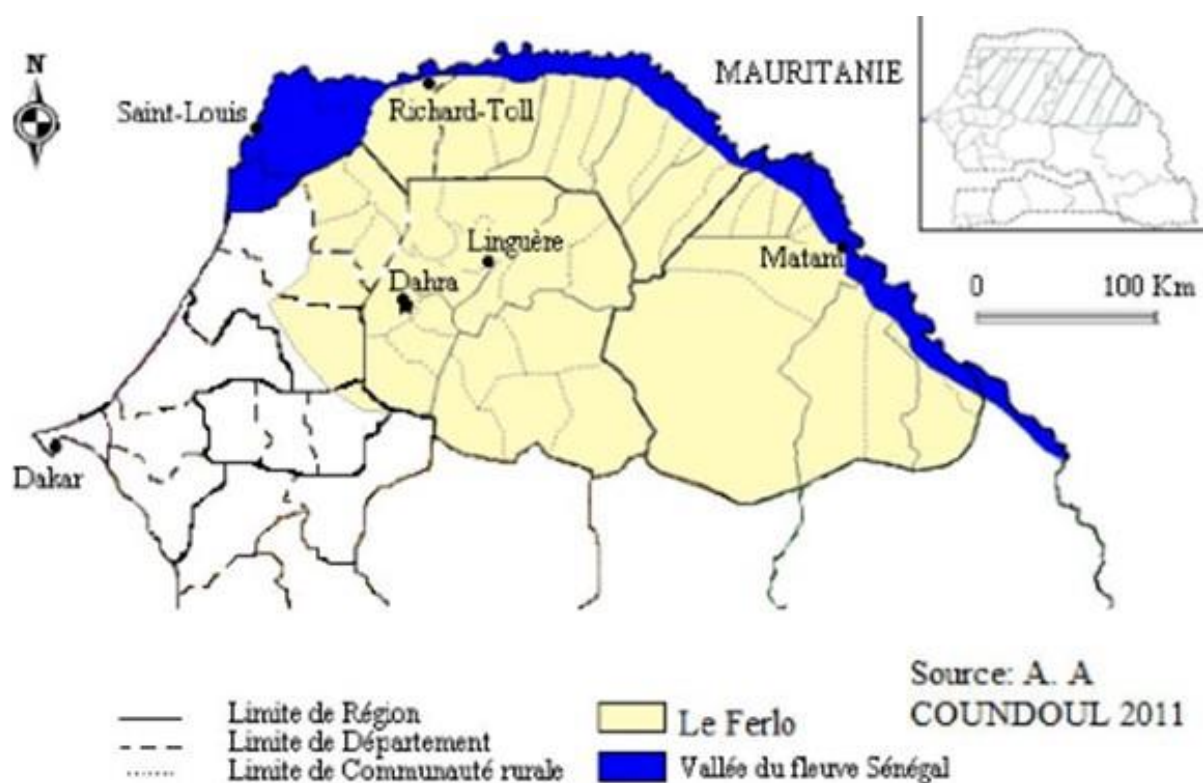


Figure 2. Carte de situation du Ferlo (Coundoul, 2011)

1.1.1. Climat

Le climat du Ferlo appartient au domaine sahélien. Il est délimité par les isohyètes 250 - 300 mm et 500 - 550 mm (Trochain, 1940). C'est une région caractérisée par un climat de type sahélien avec une longue saison sèche (9 mois), et une moyenne annuelle des précipitations

variant entre 200 et 400 mm (Aubreville, 1949). Beaucoup plus que la faiblesse des précipitations annuelles, il faut surtout mettre en lumière l'irrégularité dramatique des pluies d'une année à l'autre, et la redoutable incertitude de leur répartition. La faible pluviométrie dans cette zone pastorale influence directement les capacités hydrologiques, la flore et la faune. Elle réduit aussi la possibilité de mise en valeur agricole de la terre. Ces déterminants bioclimatiques ont une influence directe sur le niveau d'anthropisation de cet espace. C'est ainsi que l'on parle d'espace à «vocation pastorale», dans la mesure où tous ces déterminants bioclimatiques favorisent le développement de l'activité pastorale (Sarr, 2009).

L'année se décompose classiquement en deux saisons: une saison des pluies de Juillet à Octobre assez variable avec l'avènement de la sécheresse ; donc instable et une saison sèche qui dure 8 à 9 mois (André *et al.*, 2005). La saison sèche s'étend de novembre à juin et se caractérise en plus des fluctuations de température, par un tapis herbacé inexistant exception faite de la période qui suit la saison pluvieuse. La température moyenne minimale du mois le plus froid, janvier ne descend pas en dessous de 13°C - 15°C (Le Houérou, 1989). L'évapotranspiration potentielle se situe entre 4 et 6 mm par mois (Do *et al.*, 1998). La température moyenne mensuelle maximale croît de 38 à 44°C, du mois de mai au mois de juin (Le Houérou, 1989). L'évapotranspiration potentielle y atteint ses maxima avec 7 à 9 mm par mois (Do *et al.*, 1998). Pour la saison sèche de façon générale, l'insolation journalière moyenne est de 8 à 11 h c'est à dire 70 à 90% du potentiel astronomique. Le minimum d'humidité relative journalière se situe entre 10 et 20% (Cornet et Poupon, 1978). Depuis 1970, il y a une tendance à la hausse des températures de 0,1 à 1,8 °C (CSE, 2002).

1.1.2. Sols et Géomorphologie

Les sols sont divisés en deux grands ensembles morphopédologiques (Leprun, 1971):

- Les sols sableux du système dunaire (sols brun-rouge subarides) sont neutres à faiblement acides; ils contiennent 80 à 85% de sable et 3,5% d'argile en surface. Ils sont pauvres en matières organiques.

- Les sols ferrugineux tropicaux, sont de texture sableuse à sablo-argileuse, de couleur rouge, plus ou moins lessivés et aussi pauvres en matières organiques

Le relief est peu accidenté. Il s'agit d'une vaste plaine plate, aux vallées peu enfoncées. L'altitude moyenne est de 43 m. Le point culminant atteint 73 m et le plus bas, 28 m (Valenza & Diallo, 1972).

La terre est appauvrie et la rétention d'eau est faible. L'environnement est très difficile pour l'agriculture, de telle sorte qu'il est nécessaire de fertiliser les sols avec des engrais organiques, tels que fumiers, pour le développement agricole à long terme.

La région du Ferlo appartient au bassin sédimentaire sénégal-mauritanien qui regroupe les formations sableuses dunaires. L'apparition successive de ces formations permet généralement de distinguer 3 ergs principaux (Michel, 1969).

- L'erg ancien vers 40000 B.P. au cours d'une période aride, a couvert le Ferlo dans la zone septentrionale. Le modèle est une succession d'ondulations à sommet aplani plus ou moins arasé et émoussé.

- Le système ogolien des dunes rouges, âgé de 15000 à 20000 ans, est formé de cordons dunaires orientés NE-SO. Au cours des fluctuations climatiques du Quaternaire, la cuirasse ferrugineuse a été détruite en presque totalité et reconstituée en cuirasse de nappe parfois affleurantes ou sub-affleurantes, à partir des éléments démantelés (Le Houerou, 1989).

- Les dunes ogoliennes ont été localement remaniées en petites dunes barkhanoïdes d'orientation NNE-SSO. De couleur assez claire, elles sont âgées de 7500 ans environ.

Les reliefs sont séparés par des dépressions longitudinales à sol sablo-argileux grisâtre, localement calcaireux, à sol hydromorphe à engorgement temporaire où se développent les mares temporaires de saison pluvieuse.

1.1.3. Hydrologie

Il n'existe pas de réseau hydrographique organisé dans le Ferlo; l'eau des pluies qui alimente les mares temporaires peut y rester durant 5 mois environ pour constituer des points d'abreuvement. Pendant la pleine saison des pluies coïncidant avec le mois d'août, l'eau peut couvrir plus de 5% de la surface totale du Ferlo (Barral et al., 1983).

L'implantation de forages dans le Ferlo, entre les années 1950 et 1980, a permis de réduire les déficits en eau. Du fait de l'accessibilité à une ressource en eau tout au long de l'année, les forages sont devenus des points centraux dans l'espace pastoral. On a assisté à une réduction de la mobilité des éleveurs avec l'apparition dans le Ferlo d'un « micro-nomadisme » (Barral, 1982) et d'un allongement des parcours de transhumances (Diop et al., 2004). En effet, la fixation du cheptel autour des forages a entraîné une augmentation de la charge animale sur les ressources naturelles. Ainsi, il est probable que ces deux formes de transhumances coexistent. La fixation des éleveurs et du bétail, pendant une partie de l'année, amène de nouveaux besoins qui obligent les éleveurs à s'insérer économiquement dans un réseau marchand et monétaire.

Cela montre tout de même que les éleveurs sont toujours mobiles et que même s'ils sont moins dépendants de la ressource en eau, ils le sont toujours par rapport à la ressource fourragère. La plupart de ces forages sont gérés par des ASUFOR (Association des Usagers du Forages) qui a pour mission de représenter les intérêts des usagers et d'assurer la qualité du service.

1.1.4. Végétation

La végétation se présente sous la forme d'une pseudosteppe arbustive et arborée dans la partie sableuse et d'une savane arbustive dans la zone latéritique (Tappan, 1985). La végétation naturelle est marquée par une zone de savane inégalement arborée. On note parfois l'émergence de survivants de la forêt soudanienne, tels que *Adansonia digitata* et *Ceiba pentandra*. Mais d'une manière générale, les peuplements sont des épineux comme *Balanites aegyptiaca*, parfois *Acacia senegal* (espèce en régression), et le plus souvent *Acacia seyal*. Le tapis arbustif ou buissonnant est constitué par les combretacées comme le *Combretum glutinosum* (Stancioff *et al.*, 1986).

En fin de saison des pluies, la végétation sahéenne du Ferlo se présente sous la forme d'un tapis herbacé continu piqueté d'arbres et d'arbustes. Les arbres et arbustes fréquemment épineux ne forment jamais une strate continue (Akpo, 1993). La strate herbacée est caractérisée par la dominance d'espèces annuelles, notamment des Poaceae à limbes étroits et pliés ou enroulés (*Schoenfeldia gracilis*, *Aristida stipoides*, *Cenchrus biflorus*, *Choris prierii*): c'est la pseudosteppe décrite par Trochain (1980). Selon Diédhiou (1994), une grande variété de légumineuses et d'autres familles s'y trouvent.

Diverses études sur les pâturages sahéens ont montré ces dernières années une dégradation progressive du couvert végétal. Autour des forages, des zones dénudées ou auréoles sans végétation ont été observées particulièrement en début de la saison des pluies (Barral 1982; Le Houérou 1989).

1.1.5. Population et élevage

Le Ferlo est peuplé de Peuls (85%), de Wolofs, de Maures et de Sérères. À cette population locale s'ajoutent des transhumants venus du bassin arachidier du Sénégal, de la vallée du fleuve Sénégal mais aussi des pays voisins (Mauritanie et Mali, notamment) (Coundoul, 2011). Cet espace se caractérise par des densités humaines relativement faibles, moins de vingt-deux habitants au kilomètre carré (Diop *et al.*, 2004).

L'accès aux marchés des éleveurs pose problème dans un espace où les débouchés sont peu importants. En effet, les faibles densités humaines ne favorisent pas l'apparition de nombreux

foyers humains et donc de débouchés (Faye, 2006). L'activité pastorale dans le Ferlo est considérée aujourd'hui comme une activité économique nécessaire à la sécurité financière des familles d'éleveurs qui vivent la monétarisation de leur société.

L'élevage dans le Ferlo au Sénégal est de type extensif fondé sur l'exploitation des ressources naturelles. Ainsi, les troupeaux et leurs bergers se déplacent en permanence à la recherche de l'eau et des pâturages. Cette mobilité pastorale est une adaptation quotidienne et saisonnière, avec les transhumances, aux conditions bioclimatiques du milieu.

L'élevage est pratiqué par les peulhs possédant des bovins de race Gobra. A partir d'une transhumance entre le fleuve en saison sèche et les pâturages plus méridionaux en hivernage, une sédentarisation s'est produite autour des forages. Les petits ruminants sont largement associés au système. L'alimentation en fourrage se fait essentiellement sur les pâturages naturels. L'abreuvement a lieu au niveau des ouvrages hydrauliques en saison sèche et au niveau des mares dès leur remplissage après les premières pluies.

La composition du troupeau dans le Ferlo reste dominée par les ovins (85%), suivis des bovins (10%) et enfin des caprins (5%). Les bovins sont composés de vaches (70%), de bœufs (10%) et de veaux estimés à 20%.

1.2. La Grande Muraille Verte (GMV)

1.2.1. Contexte de la Grande Muraille verte

La désertification, revêt en Afrique et en particulier dans la partie au sud du Sahara un visage spécifique de calamité et de pauvreté lié à une forte dégradation des ressources naturelles, une baisse des productions agricoles entraînant une situation d'insécurité alimentaire et un lourd bilan socio-économique qui impactent très négativement les efforts de développement économique de la plupart de ces pays (Lahmar *et al.*, 2011 ; GMV, 2012). Selon la FAO (2009), actuellement, plus des 2/3 de la superficie du continent africain sont couverts de zones désertiques ou fortement dégradées et une perte annuelle de 1,8 million d'hectares de couvert végétal et de superficies de terres arables a été notée. Face à cette situation récurrente de défis environnementaux multiples et à l'état de forte dégradation des écosystèmes liés en grande partie aux changements climatiques et à la désertification, dès juillet 2005, les chefs d'Etat et de Gouvernement des Etats sahélo-sahariens ont décidé d'apporter une réponse par la mise en œuvre d'une nouvelle approche dénommée « Initiative Grande Muraille Verte » (Dia & Duponnois, 2012). La Grande Muraille Verte met en synergie des actions de lutte contre la

désertification, de restauration des terres et de la biodiversité, de développement de systèmes agricoles et pastoraux, de lutte contre la pauvreté par la réalisation d'activités génératrices de revenus favorables au repeuplement des zones sahélo-sahariennes (Dia & Duponnois, 2012).

1.2.2. Mise en place de la Grande Muraille Verte

La mise en place de la GMV a été initié en 2005, lors de la 7^{ème} Conférence des Leaders et Chefs d'Etat de la Communauté des Etats sahélo-sahariens (CEN-SAD) tenue à Ouagadougou au Burkina Faso du 1^{er} au 2 juin 2005. Ce projet englobe onze pays africains au sud du Sahara sur l'axe Dakar-Djibouti principalement en zone sahélienne. En 2007, l'union africaine a adopté lors de la 8^{ème} session ordinaire de la Conférence des Chefs d'Etat et de Gouvernement tenue les 29 et 30 janvier à Addis-Abeba en Ethiopie et a approuvé l'Initiative Grande Muraille Verte du Sahara. Le tracé de la Grande Muraille Verte (GMV) est large de 15 km et va de Dakar à Djibouti (Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina Faso, Niger, Nigeria, Tchad, Soudan, Ethiopie, Erythrée, Djibouti). Il s'étire ainsi sur environ 7 000 km (Figure 3). Il n'affecte pas le désert du Sahara et est contenu dans le Sahel dans des zones éco-géographiques à moyennes pluviométriques annuelles inférieures à 400 mm (Dia & Niang; 2012).

La mise en œuvre de la GMV est réalisée en particulier par l'installation et la mise en valeur intégrée d'espèces végétales à valeur économique bien adaptées aux terres arides, de bassins de rétention, de systèmes de production agricoles et diverses activités génératrices de revenus, ainsi que des infrastructures sociales de base. En considérant l'arbre comme un élément majeur régissant l'évolution spatio-temporelle des milieux sahéliens et en conséquence toutes les activités socio-économiques qui en découlent, l'approche «Grande Muraille Verte» repose principalement sur la protection/conservation/valorisation par l'identification et la promotion de pratiques de gestion durable des terres et par le renforcement des services socio-économiques de base (GMV, 2012).

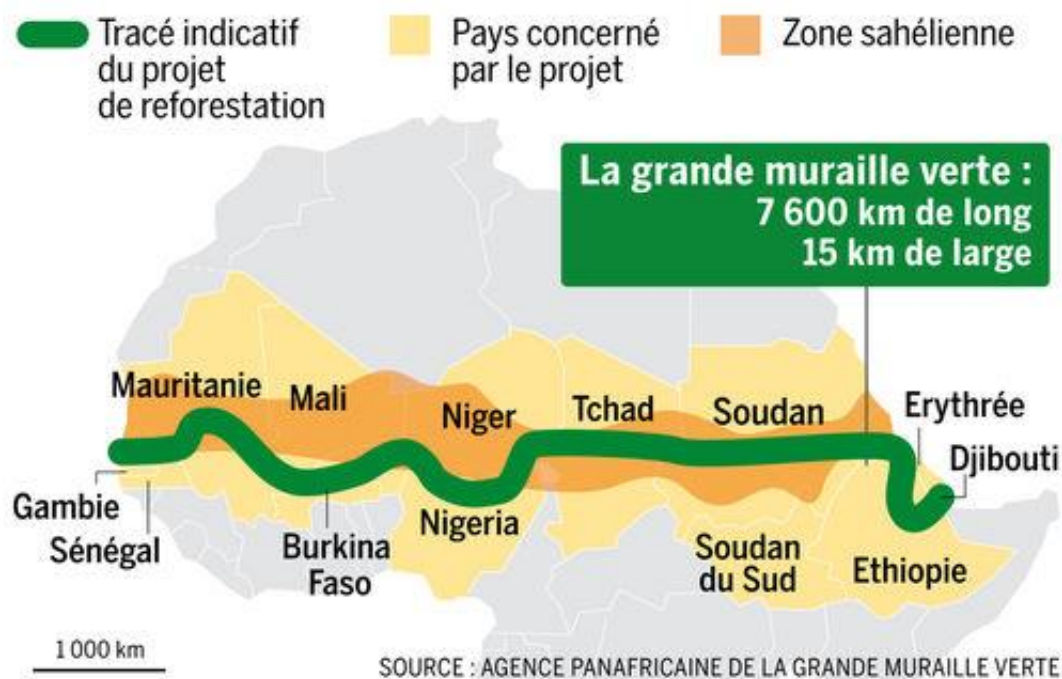


Figure 3. Tracé régional de la Grande Muraille Verte

1.3. Influence des espèces ligneuses sur les modalités de décomposition de leur litière

La biomasse microbienne correspond à la population de microorganismes hétérotrophes du sol (bactéries, champignons et actinomycètes) dont l'activité va régler l'essentiel des échanges entre le sol et la matière organique (Beare *et al.*, 1997). Elle représente 2 à 3 % du stock total de carbone et 3 à 5 % de celui en azote du sol (Feller, 1979). La biomasse microbienne est responsable de la décomposition de la matière organique. Ce sont les bactéries, les champignons et les actinomycètes. La décomposition d'un type de litière donné peut être relativement bien prédite par les caractéristiques physico-chimiques de la feuille et les facteurs abiotiques (Melillo *et al.*, 1982; LeRoy & Marks, 2006). Des études ont montré que la qualité des litières peut avoir une influence sur les communautés de détritivores (Kominoski & Pringle, 2009; Jabiol & Chauvet, 2012) et les processus de l'écosystème (Lecerf *et al.*, 2005). Les pertes de masse de litières constituent une mesure des taux de décomposition et du bon fonctionnement de l'écosystème (Gessner & Chauvet, 2002). Elles sont généralement évaluées par la technique des sacs à litière qui a été très largement utilisée par de nombreux auteurs afin de déterminer les taux de décomposition des litières en milieu réel (Bocock & Gilbert, 1957). Le principe consiste à enfermer une masse connue de feuilles séchées (à l'air) dans un sachet en nylon de différentes mailles selon l'objectif de l'expérience, ce sachet est enterré à 10 cm dans le sol.

Après un temps de décomposition défini par l'expérimentateur, le sac est sorti de terre, les feuilles nettoyées, séchées à l'étuve et pesées. Connaissant la masse initiale de litière, on peut ainsi déterminer une perte de masse, que l'on exprimera en termes de pourcentage de masse restante, qui constitue un reflet de l'efficacité du processus de décomposition. Bien que critiquée en ce que les conditions dans de tels sacs ne reflètent pas les conditions réelles du milieu (Boulton & Boon, 1991 ; Bärlocher, 2005), cette méthode présente l'intérêt indéniable de permettre, par l'utilisation de filets de mailles, la manipulation in situ des communautés de décomposeurs, par l'exclusion de certains groupes en fonction de leur taille. En effet des mailles grossières (5-10 mm) permettent l'accès aux litières par la majorité des organismes tandis que des mailles fines (0,2–0,3 mm) n'autorisent l'accès qu'aux décomposeurs microbiens (Jabiol & Chauvet, 2012). Des résultats obtenus en plein champ (Diallo *et al.*, 2006) lors de l'étude de la perte de masse des litières ont montré que la décomposition des litières varie en fonction de leur qualité biochimique. L'utilisation de la méthode des sachets a permis de suivre plus facilement la vitesse de décomposition des litières. Des études antérieures ont relevé des résultats similaires sous l'effet de résidus en décomposition (Trinsoutrot *et al.*, 2000). Les travaux d'Arunachalam *et al.* (1998) ont montré une relation favorable entre la C/N et la perte de masse des litières. La décomposition d'un substrat végétal au champ dépend également de facteurs climatiques (température, humidité), facteurs physico-chimiques du sol (texture, structure, pH...) et de facteurs biotiques (faune du sol, microorganismes). Les travaux de Diallo *et al.* (2006) et Tittone *et al.* (2013) ont montré qu'une accélération de la dégradation des litières au cours des 90 jours jusqu'à 94,5% de perte de masse dans certains cas, est due à l'influence de la pluie et aux fortes températures qui sont des facteurs favorables à l'accroissement de la biomasse microbienne et à l'augmentation de leur activité. D'autres études ont montré aussi que les facteurs du milieu d'étude, le caractère morphologique des litières (épaisseur et rigidité) ainsi que la macrofaune peuvent avoir autant d'importance que la qualité biochimique des litières lors de la décomposition (Guo & Sims, 2001; Torreta & Takeda, 1999).

1.4. Influence des espèces ligneuses sur la biotransformation de l'azote dans le sol

L'étude des cycles du carbone, de l'azote et des éléments minéraux dans les zones semi-arides souligne l'importance des ligneux dans l'apport des arbres, à travers les dépôts de litière et la biomasse racinaire, source d'éléments minéraux (Masse *et al.*, 1998). Une fois arrivée au sol, la litière des espèces ligneuses est d'abord décomposée, puis minéralisée. Plusieurs processus

majeurs interviennent au cours des biotransformations de l'azote organique dans le sol. Il y a d'abord le processus de minéralisation qui correspond à la transformation de la matière organique (MO) endogène du sol ou exogène (litières) par la microflore hétérotrophe du sol. Cette première étape conduit à la formation d'ammonium (N-NH_4^+). C'est le processus d'ammonification appelé aussi minéralisation « brute » (Alef, 1995). Le terme ammonification désigne la transformation de l'azote organique en ammonium. Au cours de ce processus de minéralisation de la MO, il peut y avoir un processus inverse appelé organisation au cours duquel l'azote minéral, ammoniacal ou nitrique, est assimilé par les microorganismes et transformé en azote organique.

La minéralisation nette de l'azote résulte de l'intensité des deux processus de minéralisation brute et d'organisation. En présence de résidus végétaux dans le sol, la quantité d'azote contenue dans les résidus organiques (souvent traduit par leur rapport C/N) influence fortement ce bilan qui est lié à la composition biochimique des litières notamment le rapport carbone/azote (C/N). La décomposition des résidus à faible C/N (riche en azote) induit une minéralisation nette d'azote alors que la décomposition des résidus à C/N élevé (pauvre en azote) nécessite de prélever l'azote nécessaire au fonctionnement microbien, dans le compartiment minéral du sol, et provoque donc généralement une organisation nette d'azote (Bock *et al.*, 1991). Par la suite, vient la phase de nitrification, qui aboutit à la transformation de l'ammonium (N-NH_4^+) en nitrate (N-NO_3^-) (Prosser, 1986). Cette nitrification est généralement attribuée aux microorganismes autotrophes aérobies appartenant à la famille des *Nitrobacteriaceae* comme les genres *Nitrosomonas* et *Nitrobacter* (Head *et al.*, 1993). Ces bactéries nitrifiantes utilisent l'azote ammoniacal ou les nitrites comme source d'azote et comme source d'énergie (donneurs d'électrons), le gaz carbonique et les carbonates comme source de carbone (Watson *et al.*, 1989). Dans les sols, on rencontre les genres *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus* et *Nitrosovibrio* pour l'oxydation de l'ammonium, avec *Nitrosolobus* considéré comme le genre oxydant l'ammonium le plus représenté (MacDonald, 1986). Par contre, un seul genre oxydant le nitrite, *Nitrobacter*, a pour l'instant été rencontré dans les sols, même si la présence du genre *Nitrospira* est aussi fortement suspectée.

La disponibilité du N-NH_4^+ représente un facteur important de régulation de la nitrification. Sous couvert végétal, existe une compétition forte entre les racines et les nitrifiants pour ce substrat (Lata, 1999). Or, les nitrifiants sont considérés comme de faibles compétiteurs par rapport aux végétaux et les hétérotrophes pour le N-NH_4^+ (Jones & Richards, 1977). Selon

(Robertson, 1989), le N-NH₄⁺ non immobilisé dans la rhizosphère des arbres en forêt est rapidement absorbé par les racines, et cette vitesse d'absorption limite la nitrification dans les écosystèmes forestiers. Dans le cas d'un bouleversement de la couverture végétale, par exemple lors d'une déforestation, les organismes nitrifiants voient leur accès à l'ammonium facilité, et donc le potentiel de nitrification augmenté tandis que des pertes importantes par lixiviation apparaissent (Vitousek, 1981). Dans les systèmes agroforestiers, par exemple, les arbres protègent les sols contre l'érosion et améliorent leur fertilité par la fixation de l'azote ou le dépôt à la surface des minéraux provenant des couches profondes du sol par la chute des feuilles (Brochard *et al.*, 2013). D'une manière générale, l'arbre fournit des bénéfices matériels, alimentaires, participe à l'ombrage, à la protection, aux besoins ménagers et surtout à la structuration et à la fertilisation des sols (Brochard *et al.*, 2013).

1.5. Influence des espèces ligneuses sur la biomasse de la végétation herbacée

Le rôle de l'arbre dans l'écosystème sahélien est prépondérant. En plus de représenter de l'ombrage et une aire de repos pour les animaux, il sert aussi de survie aux animaux en cas de disparition du couvert végétal en saison sèche et à une influence positive sur la végétation herbacée (Weltzin & Coughenour, 1990). Le houppier des arbres intercepte et absorbe une partie des précipitations, réduisant la quantité d'eau qui atteint le sol (IBGE, 2014). Ainsi, une partie de l'eau de pluie est interceptée par le feuillage de l'arbre et s'écoule le long du tronc ce qui entraîne une meilleure infiltration. Il contribue à la réalisation des échanges clés entre l'air, le sol et les ressources locales en eau renouvelables (nappes, rivières, lacs) en limitant le ruissellement (Vittel, 2013) et en diminuant les risques de perte de fertilité (Prosensols, 2010). Par ailleurs, l'arbre constitue la principale source de fourrage aérien vert en toute saison (Sarr *et al.*, 2013). Selon Akpo (1993) et Diallo *et al.* (2015a), l'arbre influence la structure spécifique de la strate herbacée en modifiant sa composition et en augmentant la richesse floristique. Il participe aussi à la fertilisation des sols. En effet, la litière qui arrive au sol est riche en éléments nutritifs, ce qui améliore la qualité du sol et la disponibilité des éléments minéraux rendant cette partie plus fertile donc plus favorable au développement des herbacées (Remigi *et al.*, 2008; Diallo *et al.*, 2006 ; Ngom *et al.*, 2013). D'autres travaux comme ceux d'Akpo *et al.* (2003), ont montré qu'en zones semi-arides, le nombre d'espèces liées au couvert ligneux est nettement plus élevé que le nombre d'espèces inféodées aux milieux découverts. De même, dans la zone protégée, la végétation herbacée sous couverture est beaucoup plus diversifiée que celle du biotope découvert et que le seul facteur discriminant reste l'ombrage généré par le couvert de l'arbre (Akpo, 1993, Akpo *et al.*, 1999). D'autres résultats viennent appuyer ces observations

(Belsky *et al.*, 1993). Ils indiquent l'effet favorable de l'arbre sur la végétation herbacée faiblement pâturée.

1.6. Description botanique de quelques plantes ligneuses du Ferlo

Les cinq (5) espèces ligneuses choisies pour notre étude, sont de type Sahélien et elles sont extrêmement résistantes à la sécheresse. Cette résistance ainsi que leur rôle déterminant dans la lutte contre la dégradation des sols des régions Soudano-sahélienne justifient leur utilisation dans les systèmes agroforestiers et les projets de revalorisation des terres dégradées notamment le projet de la Grande Muraille Verte. Elles se distinguent aussi par la composition biochimique de leur litière différente, leur famille et leur usage socio-économique.

1.6.1. *Acacia senegal* (L.) Willd.

Acacia senegal encore appelé gommier blanc, est un arbre typique du Sahel de la famille des *Fabacées*. *Acacia senegal* compte 4 variétés (Brenan, 1983) : *senegal*, *kerensis* Schweinf, *rostrata* Brenan et *leiorachis* Brenan. La variété *senegal* est la plus répandue dans les zones sèches au sud du Sahara. Les peuplements économiquement intéressants se situent en Mauritanie, au Mali, au Niger, au Tchad et au Soudan (Berhaut, 1974, 1975 ; Sall, 1997). Sa classification classique au niveau taxonomique est la suivante :

Règne : Plantae

Sous-règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe: Dicotylédones ; - **Sous – classe** : Dialypétales

Ordre : Fabales ; **Super-famille** : Légumineuses

Famille : *Mimosaceae*

Genre : *Acacia*

Espèce : *Acacia senegal*



Photo 1. *Acacia senegal*

1.6.1.1. Description Botanique

Tableau 1. Description botanique de l'*A. senegal* selon Arbonier (2002)

Description	Caractéristiques
Port	Arbre ou arbuste épineux de 2-6(-12) m de haut, à cime étalée et ouverte, à branches très ramifiées, ascendantes.
Ecorce	Gris clair à brun clair, plus ou moins lisse et écailleuse, à tranche rouge marbrée de blanc.
Rameau	Jaunâtre devenant noirâtre, lenticellé et plus ou moins pubescent.
Épines	En crochets, disposées par (1-)3 à la base des feuilles, la centrale courbée vers le bas, les deux autres vers le haut, d'environ 3-6 mm de long, grises.
Feuilles	Alternes, bipennées d'environ 2,5 cm de long, avec (2-)3-6 paires de pinnules et 7-19(-25) paires de foliolules par pinnule. Foliolule oblongue, plus ou moins pubescente.
Pétiole	Porte une glande à la base et souvent d'autres entre les bases des 1-5 dernières paires de pinnules.
Inflorescence	Fascicule de 2-3 racèmes spiciformes, disposé à l'aisselle des feuilles.
Fleur	Crème.
Fruit	Gousse pubescente puis glabre, linéaire, plate, plus ou moins papyracée, pointue aux deux bouts, à surface plus ou moins veinée,
Graine	brune, plus ou moins plate et ronde.

Floraison : A la feuillaison, avant les premières pluies, mais parfois aussi en fin de saison des pluies.

Habitat : Espèce sahélienne et soudano-sahélienne, sur sols limoneux légers, bruns argileux, parfois sur lithosols, mais préfère les sols sableux. Espèce très résistante à la sécheresse (8-11 mois sans pluie).

Répartition : Du Sénégal au Cameroun, jusqu'au Soudan. Afrique tropicale et australe, Inde.

1.6.1.2. Usages et intérêts de l'A. senegal

A. senegal présente de nombreux intérêts. Sa fonction la plus importante est la production de gomme arabique qui est économiquement rentable (Poda *et al.*, 2009). La plante fournit 90% de la gomme arabique mise sur le marché international et surpasse en qualité tous les autres *Acacia* (Samb, 2010). La gomme fournit joue un rôle dans l'industrie agro-alimentaire, dans le domaine du textile, dans l'industrie du papier (collage des étiquettes, enveloppes) et sert aussi d'émulsifiant pour les huiles d'agrumes (Samb, 2010). Les feuilles et les fruits sont appréciés par les animaux et constituent une source de fourrage. *A. senegal* fournit du bois, du charbon mais également des remèdes traditionnels. En effet, les feuilles sont utilisées contre la diarrhée et les dermatoses (SIFOR, 2009). Les écorces de tronc ou de racine sont considérées comme anti-inflammatoires et s'utilisent dans le traitement des angines et des hémorragies (SIFOR, 2009). Les branches épineuses des *Acacia* permettent la confection des haies mortes. Elles jouent le rôle de protection des parcelles de cultures ou de délimitation des enclos des animaux domestiques (Samb, 2010).

Par ailleurs, l'espèce *A. senegal* est capable de former une association symbiotique avec des bactéries du genre *Rhizobium*, présentes dans les nodosités des racines. Cette symbiose racinaire favorise la fixation biologique de l'azote de l'air N₂ (IRD, 2008). Cette capacité de restauration ainsi que son excellente adaptation aux conditions arides font de cette espèce l'une des plus utilisées dans les programmes de reboisement en zones sèches (Soloviev *et al.*, 2009) pour la revalorisation des sols dégradés. C'est ce qui explique son utilisation en agroforesterie pour la fixation des dunes (Samb, 2010) et dans les jachères améliorées en Afrique Sub-saharienne pour la restitution des sols dégradés. L'*A. senegal* est ainsi capable de reconstituer les sols à la fois grâce à l'abondance de sa biomasse végétale et à son aptitude à mobiliser l'azote atmosphérique (Poda *et al.*, 2009).

1.6.2. *Acacia tortilis* var. *raddiana* (Savi) Brenan

Acacia tortilis (Forsk.) Hayne possède quatre (4) sous-espèces dont deux renferment chacune deux (2) variétés (Goudiaby, 2003) qui sont les suivantes :

- subps. *tortilis*;
- subps. *raddiana* (Savi) Brenan var. *raddiana*;
- subps. *raddiana* (Savi) Brenan var. *pubescens* A. Chev.;
- subps. *spirocarpa* (Hochst. ex A. Rich.) Brenan var. *spirocarpa*;
- subps. *spirocarpa* (Hochst. ex A. Rich.) Brenan var. *crinita* Chiov.;
- subps. *heterocantha* (Burch.) Brenan

A. tortilis se retrouve en Afrique du Sénégal et de la Mauritanie à la Mer Rouge en passant par le Sahara et la Tunisie (Aubréville, 1950, Berhaut, 1974, 1975). En dehors de l'Afrique, on le retrouve en Australie, en Asie et en Amérique (Von Maydell, 1983). Au Sénégal, on rencontre uniquement *Acacia tortilis* (Forsk.) Hayne subsp. *raddiana* (Savi) Brenan var. *raddiana* (Goudiaby, 2003). Sa classification classique au niveau taxonomique est la suivante :

Règne : Plantae

Sous-règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe: Dicotylédones ; - **Sous – classe :** Dialypétales

Ordre : Fabales ; **Super-famille :** Légumineuses

Famille : *Mimosaceae*

Genre : *Acacia*

Espèce: *Acacia tortilis*

Synonymes : *Acacia raddiana* Savi, *A. fasciculata* Guill. et Perrott., *A. tortilis* var. *pubescens* A. Chev.

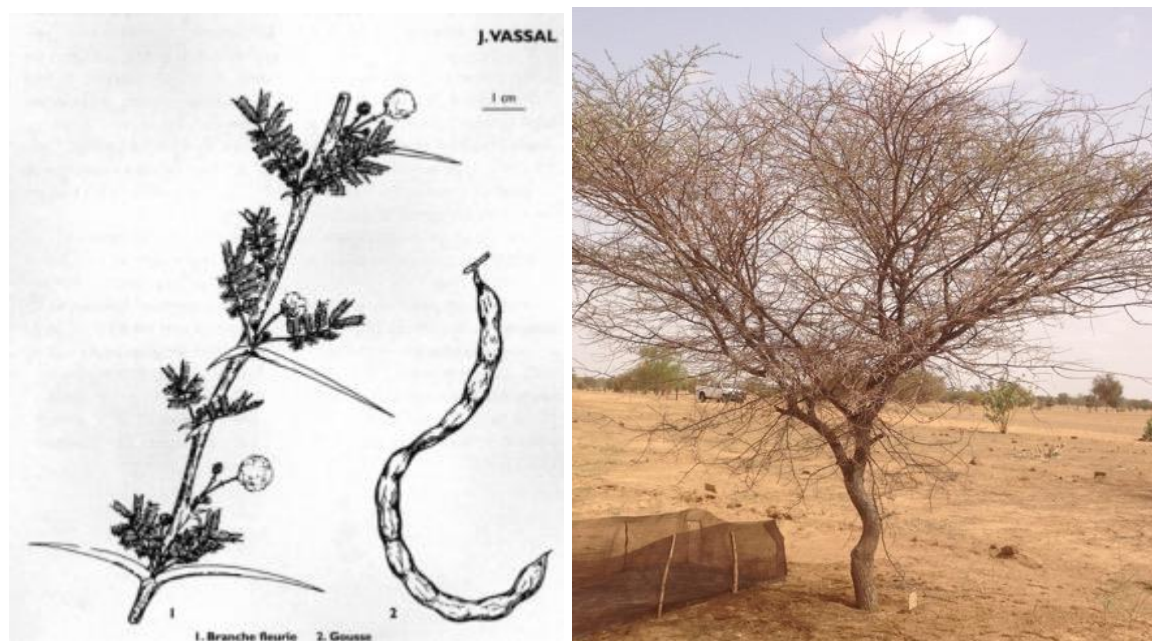


Photo 2. *Acacia tortilis* var. *raddiana*

1.6.2.1. Description Botanique

Tableau 2. Description botanique de l'*A. tortilis* var. *raddiana* selon Arbonier (2002)

Description	Caractéristiques
Port	Arbre épineux de 12-13(-21) m de haut, à fût cylindrique et plus ou moins.
Ecorce	Peu crevassée à fissurée, brune, à tranche brun rosé.
Rameau	Rougeâtre à violet noirâtre, plus ou moins glabre ou pubérent.
Épines	Droites pour la plupart, atteignant 5(-10) cm de long, d'autres plus ou moins courbes atteignant 0,5 cm de long, disposées par deux à la base des feuilles, blanches.
Feuilles	Alternes, bipennées, avec 2-5(-10) paires de pinnules et 6-15(-20) de foliolules par pinnule. Foliole oblongue, plus ou moins pubescente.
Pétiole	Porte souvent sur le dessus une petite glande avant la première paire de pinnules et parfois d'autres entre les 1-2 premières paires de pinnules.
Inflorescence	Fascicule disposé à la base des feuilles, composé de (1-)3-6 glomérules, blanchâtres, pédonculés.
Fruit	Gousse plus ou moins enroulée en spirale, glabre ou pubescente, vert pâle à jaunâtre à maturité, contenant jusqu'à 10 graines.
Graine	brune, plus ou moins bombée, elliptique ou ronde.

Floraison : En saison des pluies, après l'apparition des premières feuilles.

Habitat : Espèce saharienne, sahélienne à soudano-sahélienne. Préfère les sols sableux, mais se trouve aussi dans la pierraille, les éboulis latéritiques et les bords de mares temporaires.

Répartition : Du Sénégal au Cameroun jusqu'en Somalie. Afrique tropicale, Afrique du Nord, Moyen-Orient et Arabie. Commune et assez grégaire, parfois en peuplement pur.

1.6.2.2. Usages et intérêts de l'*A. tortilis* var. *raddiana*

A. tortilis est source de plusieurs usages, d'autant plus que toutes les parties du végétal sont utilisables notamment les écorces (Kerharo & Adam, 1974 ; El Ayadi, 2013). En tant que légumineuse, l'*A. tortilis* est capable de former une association symbiotique avec les microorganismes. Cette symbiose lui permet d'assimiler l'azote atmosphérique et de le restituer au sol, au bénéfice de la végétation. Ce rôle capital de l'espèce ainsi que son adaptation à la sécheresse en fait une essence de choix dans les activités de reforestation des zones arides (FAO, 2008) pour combattre l'érosion et revaloriser les terres dégradées. *A. tortilis* produit aussi de la gomme arabique utilisé en industrie alimentaire.

Il est partout reconnu un grand intérêt fourrager aux feuilles, gousses, jeunes rameaux et même épines, et ce plus particulièrement pour les chèvres et les dromadaires. Les feuilles, fleurs et fruits sont éventuellement collectés par les bergers et distribués aux chèvres (Schulz & Amadou, 1992).

1.6.3. *Balanites aegyptiaca* (L.) Del.

Le dattier du désert (*Balanites aegyptiaca* Delile), appelé *savonnier* au Tchad, ou *sump* au Sénégal, est un arbre du genre *Balanites* présent et cultivé notamment en Afrique tropicale. C'est un genre tropical afro-asiatique, d'environ 25 espèces vivant dans des régions sèches subarides et même arides dont les pluviométries moyennes annuelles sont moins de 1000 mm (Ndiaye, 1996). En Afrique de l'Ouest on retrouve deux espèces : le genre *B. aegyptiaca* (L.) DEL. qui est présent en savane, et le genre *B. wilsoniana* Dawe et Sprague que l'on retrouve en forêt (Ndiaye, 1996). Selon la classification classique, *B. aegyptiaca* appartient au :

Règne : Plantae

Sous-règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida ; **Sous-classe** : Rosidae

Ordre : Sapindales

Famille : *Zygophyllaceae (Balanitaceae)*

Genre : *Balanites*

Espèce : *Balanites aegyptiaca*

Synonymes : *Ximenia aegyptiaca* L., *Agialida senegalensis* van Tiegh., *A. barteri* van Tiegh., *A. tombuctensis* van Tiegh., *Balanites ziziphoides* Mildbr. & Schlechter

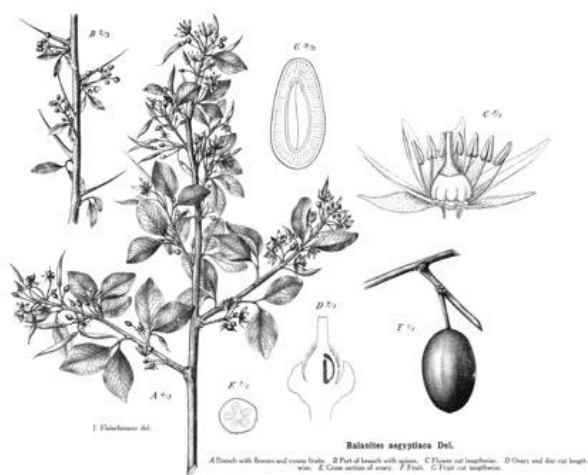


Photo 3. *Balanites aegyptiaca*

1.6.3.1. Description Botanique

Tableau 3. Description botanique de *B. aegyptiaca* selon Arbonier, 2002

Description	Caractéristiques
Port	Arbre à cime sphérique, atteignant 8-9 m de haut. Port remarquable avec ses branches retombantes souples, armées de longues épines alternes ou disposées plus ou moins en spirale.
Ecorce	Lisse (arbre jeune) devenant crevassée et fissurée, beige à noirâtre, à tranche beige à brun pâle.
Rameau	Glabre ou presque, verdâtre à beige, plus ou moins lenticellé.
Épines	Droites, disposées à l'aisselle des feuilles, beige verdâtre.
Feuilles	Alternes, composées bifoliolées, insérés sous la base des épines. Folioles elliptiques, obovales rhomboïdes, sommet pointu obtus ou émarginé, à base en coin ou atténuée, à dessous vert-gris mat.
Pétiolule	De 1-4 mm de long.
Nervation	Pennée, à 5-9 paires de nervures secondaires peu saillantes.

Inflorescence Petit racème disposé à l'aisselle des feuilles, composé de fascicules.

Fleur Jaune verdâtre, sur un pédicelle de 1 cm de long, à 5 pétales et 5 sépales.

Fruit Drupe ellipsoïde, 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.

Floraison : Durant presque toute la saison sèche.

Habitat : Zones sahéliennes à soudano-sahéliennes. Peu exigeante quant au sol, plutôt sur sols sableux, pierreux ou lourds. Indicateur du surpâturage.

Répartition : Afrique tropicale sèche, du Sénégal au Soudan, Afrique orientale, de l'Égypte à la Zambie, Arabie et Inde. Distribution irrégulière, localement commune et grégaire.

1.6.3.2. Usages et intérêts de *Balanites aegyptiaca*

Le dattier du désert a deux usages : alimentaire et médicinal. Les fruits sont également consommés par les animaux et les personnes. Cette consommation est proche de celle d'une datte ou d'une friandise (FAO, 2008). *B. aegyptiaca* fait partie des espèces sempervirentes ce qui lui permet de fournir une alimentation complémentaire essentielle pour le bétail pendant la saison sèche (Fleur, 2009). L'espèce s'utilise aussi en tant que phase grasse dans la fabrication de crèmes et du lait pour le corps et le visage et de champoing pour les cheveux. Les boutures forment des clôtures vivantes pour protéger les cultures contre la divagation des animaux ou servir de délimitation foncière (Rongead, 2014). En médecine traditionnelle, l'écorce permet de soigner les vermifuges et les maux de ventre et les fruits sont efficaces contre le rhumatisme (Kerharo & Adam, 1974 ; Arbonier, 2002), la régulation de la tension artérielle et la constipation. Les racines, les fruits et les feuilles sont souvent utilisés contre les maux de dents, la stérilité, les maladies mentales et la fièvre jaune (FAO, 2008).

1.6.4. *Boscia senegalensis* (Pers) Lam. Ex Poir

B. senegalensis est une espèce de plantes ligneuses pérennes de la famille des *Capparaceae*. Il est toujours vert avec une cime arrondie et dense. Son habitat se situe dans les zones sahéliennes à soudaniennes sur stations sèches, sols rocheux, latéritiques, sableux (dunes), et sur sols compacts sablo-argileux (Arbonier, 2002). Selon la classification classique, *B. senegalensis* appartient au :

Règne : Plantae

Sous-règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Ordre : Capparales

Famille : *Capparaceae*

Genre : *Boscia*

Espèce : *Boscia senegalensis*

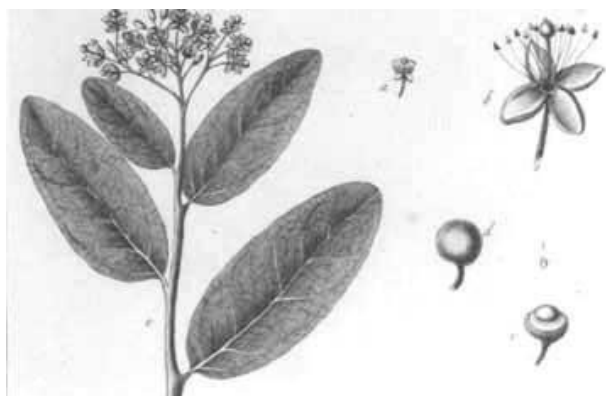


Photo 4. *Boscia senegalensis*

1.6.4.1. Description Botanique

Tableau 4. Description botanique de *B. senegalensis* selon Arbonier (2002)

Description	Caractéristiques
Port	Arbrisseau ou arbuste de 1-5 m de haut, toujours vert, à cime arrondie et dense.
Ecorce	Lisse et plus ou moins gruméleuse, gris noirâtre
Rameau	Gris-brun, plus ou moins pubescent.
Feuilles	Alternes, coriaces et rigides à dessus vert foncé glabre et dessous clair plus ou moins pubescent, Limbe ovale ou elliptique, à sommet obtus et mucroné et à base arrondie ou en coin.
Pétiole	De 0,5-1,3 cm de long.

Nervation	Pennée, saillante, à 5-10 paires de nervures latérales se raccordant nettement en formant une nervure à 2-3 mm de la marge du limbe. Nervilles saillantes et réticulées, translucides à l'état frais.
Inflorescence	Corymbe terminal.
Fleur	Blanc verdâtre à jaunâtre, apétale, à 4 sépales pubescents.
Fruit :	Baie sphérique, surface finement pubescente, jaune-brun à maturité contenant une pulpe visqueuse dans laquelle sont noyées 1 ou 2 graines.

Floraison : Première partie de saison sèche.

Habitat : En zones sahéliennes à soudaniennes, sur stations sèches, sols rocheux, latéritiques, sableux (dunes) et sur sols compacts sablo-argileux.

Répartition : De la Mauritanie et du Sénégal jusqu'en Ethiopie. Assez commune, localement abondante et grégaire.

1.6.4.2. Usages et intérêts de *Boscia senegalensis*

Il a un rôle important dans l'absorption et la conservation de l'eau du sol grâce à la présence de faisceaux surnuméraires au niveau des racines (Habu, 2014). Il joue, par ailleurs, un rôle de premier choix dans la diversification des ressources alimentaires (Habu, 2014). *B. senegalensis* offre différentes variétés de produits. Séchées les graines donnent un aliment important utilisé comme les lentilles ou sous forme de farine; rôties elles remplacent le café. Les feuilles sont consommées comme légumes; dédaignées par les bovins, elles sont bien broutées par les chèvres et les moutons. Le bois bouilli donne un liant doux. Cuite, la chair des fruits immatures est comestible; mûre, elle l'est crue (Arbonier, 2002).

Différents usages en médecine humaine ou vétérinaire. Par exemple les feuilles contre les névralgies et les coliques comme moyen de protection des provisions contre les parasites dans les greniers ; en poudre avec du sel contre la bilharziose. Les racines sont vermifuges.

1.6.5. *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst.

S. birrea appelé prunier d'Afrique, est retrouvé principalement en Afrique subsaharienne en dehors de la zone de la forêt humide, de la Mauritanie et du Sénégal jusqu'en Ethiopie et Erythrée, et vers le sud jusqu'en Namibie, au Botswana, au Zimbabwe, au Mozambique, en Afrique du Sud et au Swaziland (Bérhaut, .1974, 1975). Il ne comprend que 2 espèces : le *S. gillettii* Kokwaro qui est un petit arbre ou arbuste endémique au Kenya et le *S. birrea* rencontrée en Afrique sub-saharienne et au Madagascar. Le *S. birrea* pour sa part compte trois différentes sous-espèces qui sont : *S. birrea* subsp. *caffra* (Sond.) Kokwaro qui est distribuée de l'Afrique

du Sud jusqu'au Kenya, le *S. birrea* subsp. *birrea* présente en Afrique de l'Ouest, du Centre et de l'Est et le *S. birrea* subsp. *multifoliolata* (Engl.) qui est endémique à la Tanzanie (Soloviev *et al.*, 2009). Selon la classification classique, *S. birrea* appartient au :

Règne : Plantae

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Ordre : Sapindales

Famille : *Anacardiaceae*

Genre : *Sclerocarya*

Espèce : *Sclerocarya birrea*

Sclerocarya birrea (A. Rich.) Hochst.



Photo 5. *Sclerocarya birrea*

1.6.5.1. Description Botanique

Tableau 5. Description botanique de *S. birrea* selon Arbonier (2002)

Description	Caractéristiques
Port	Arbre à cime arrondie et relativement dense atteignant 12 m de haut.
Ecorce	Ecailleuse, grise plus ou moins argentée, à tranche rougeâtre, fibreuse et spongieuse.
Rameau	Gris-brun, plus ou moins pubescent à l'état juvénile.
Feuilles	Alternes, imparipennées divergentes réparties aux bouts des rameaux très épais, 6-10 paires de folioles opposées ou subopposées. Limbes obovales

ou elliptiques à sommets arrondis ou pointus et toujours mucronés, à bords entiers.

Pétiole	Parfois légèrement ailé entre les folioles.
Pétiolule	De 2-4 mm de long.
Nervation	Pennée, peu saillante, à 8-12 paires de nervures secondaires sécantes au bord du limbe.
Inflorescence	Espèce dioïque. Racème femelle terminal, de 3-5 cm de long ; épis mâles terminaux, de 5-8 cm long.
Fleur	Fleur femelle pédicellée, rougeâtre ou verdâtre. Fleur mâle subsessile, à 4 pétales roses ou verdâtres.
Fruit	Drupe globuleuse, glabre, jaune à maturité, à peau épaisse, contenant un noyau épais.

Floraison et fructification : En fin de saison sèche, plutôt avant l'apparition des premières feuilles.

Habitat : Savanes sahélo-soudaniennes à soudaniennes, surtout sur sols sableux. Commune et assez grégaire.

Répartition : En Afrique de l'Ouest. Du Sénégal au Cameroun, jusqu'en Ouganda et en Ethiopie.

1.6.5.2. Usages et intérêts de *Sclerocarya birrea*

S. birrea est une espèce qui offre plusieurs intérêts aux populations. Le produit principal est le fruit. La chair du fruit cru est consommée, la peau étant jetée, ou bien le jus est sucé. Les amandes extraites du fruit sont également consommées crues. (Eyog Matig *et al.*, 2006). Le fruit peut être transformé en huile ou en confiture. La pulpe comestible contenu dans le fruit est consommée fraîche ou fermentée sous forme de jus ou de boisson alcoolisée (Eyog Matig *et al.*, 2006). L'huile est aussi utilisée en cuisine et pour les soins de la peau. Les amandes sont écrasées et utilisées pour fabriquer des gâteaux ou des biscuits ou comme ingrédient dans la soupe, ou de l'huile en est extraite et utilisée comme agent de conservation de la viande. Les feuilles de même que les fruits sont consommés par les animaux pendant la saison sèche. *S. birrea* possède des valeurs médicinales à travers les feuilles, racines et écorces (Kerharo & Adam, 1974).

La fermentation ménagère du fruit donne une boisson alcoolisée qui est soit consommée directement soit distillée pour produire un alcool fort. Le jus bouilli est utilisé pour aromatiser et sucrer la bouillie (<http://www.doc-developpement-durable.org>).

Synthèse bibliographique

Le feuillage de *S. birrea* est consommé par le bétail, mais ne constitue jamais une source importante de fourrage. Mis à part les fruits tombés, l'usage est intermittent, excepté durant les périodes de pénurie générale de fourrage où les pasteurs ébranchent les arbres pour rendre le feuillage accessible au bétail (<http://www.doc-developpement-durable.org>).

Chapitre II : Matériels et Méthodes

2.1. Le site

L'étude a été réalisée à Widou au Nord du Sénégal (15°58'30''N et 15°17'90''O, altitude 43 m) entre mars 2014 et mars 2016 (Figure 4). Le climat est de type sahélien aride caractérisé par deux saisons bien distinctes : une saison sèche de huit à neuf mois (octobre à juin) et une saison humide avec des pluies concentrées sur une période de trois à quatre mois (juillet à septembre) (Tableau 6).



Figure 4. Situation géographique de la zone d'étude (Ndiaye *et al.*, 2014)

Les données climatiques ont montré que les températures sont plus élevées et la pluviométrie est plus faible en 2014 qu'en 2015. La température la plus faible (26 °C) a été enregistrée en janvier 2015 et la plus élevée en juin 2014 (34 °C) alors que le maximum de pluie a été noté en août 2015 avec 200 mm (Tableau 6). L'ensoleillement est aussi plus élevé en 2014 qu'en 2015 avec des pics en mars et mai 2014.

Sur le plan morphopédologique, la zone d'étude appartient au Ferlo sableux caractérisé par un relief peu accidenté avec des sols subarides tropicaux et brun clair formés de matériaux sableux

pauvres en argile (Diallo *et al.*, 2013). En ce qui concerne l'hydrologie, on distingue les nappes profondes, appelées aquifères du Maestrichtien et de l'Éocène d'une part et celles dites superficielles ou nappes du Continental terminal et du Quaternaire d'autre part (Michel, 1973). La végétation est composée d'arbres épineux, d'arbustes et d'herbes annuelles (Le Houérou, 1989). Le taux de recouvrement de la végétation herbacée est de 70% pendant la saison pluvieuse avec une hauteur moyenne de 30 à 40 cm et une espèce dominante, *Aristida mutabilis*. Le taux de couverture de la végétation ligneuse est de 15% avec comme espèce dominante *B. aegyptiaca* (Diallo *et al.*, 2015a).

Tableau 6. Variations des facteurs climatiques dans la zone d'étude entre 2014 et 2015

Mois	Janv	Fév	Mars	Av	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
	Année 2014											
Pluviométrie (mm)	0	0	0	0	0	2	90	159	92	30	0	0
Température moyenne (°C)	26	26	29	33	32	34	32	29	31	33	30	26
Ensoleillement (heures)	288	242	316	209	319	245	242	222	256	288	267	185
	Année 2015											
Pluviométrie (mm)	0	0	0	0	0	0	9	200	94	9	0	0
Température moyenne (°C)	26	28	29	33	33	33	32	30	30	32	31	26
Ensoleillement (heures)	152	238	188	219	251	208	216	215	186	143	155	101

2.2. Choix des plantes ligneuses

Cinq espèces ligneuses ont été choisies de manière aléatoire parmi les essences retenues pour la restauration des écosystèmes sahéliens dans le cadre du projet de reforestation panafricaine de la Grande Muraille Verte dans la zone sahéenne en général (Mahatma-Saleh *et al.*, 2015) et dans le nord du Sénégal en particulier (Ndiaye *et al.*, 2014). Ce sont des espèces indigènes donc parfaitement adaptées au climat sahéen (Diallo *et al.*, 2015a). Certaines espèces sont issues de plantations naturelles (*B. aegyptiaca*, *B. senegalensis* et *S. birrea*) tandis que d'autres sont issues de reboisement (*A. senegal* et *A. tortilis* var. *raddiana*). Elles sont très résistantes à la sécheresse et appartiennent à des familles différentes (Tableau 7). Leurs feuilles, fleurs et fruits, sont très utilisés pour l'alimentation

des bovins, caprins et ovins (Niang *et al.*, 2014). Ces espèces représentent aussi une source de production de bois et contribuent à la fixation des sols (Dupuy *et al.*, 1991).

Tableau 7. Liste des espèces ligneuses choisies

Familles	Espèces ligneuses	Position géographique
<i>Anacardiaceae</i>	<i>Sclerocarya birrea</i> (A. Rich.) Hochst	5°58'20'' N et 15°17'15'' O
<i>Balanitaceae</i>	<i>Balanites aegyptiaca</i> (L.) Del.	15°58'30'' N et 15°17'8'' O
<i>Capparaceae</i>	<i>Boscia senegalensis</i> (Pers.) Lam. ex Poir	15°58'27'' N et 15°17'12'' O
	<i>Acacia senegal</i> (L.) Willd	15°58'26'' N et 15°17'11'' O
<i>Mimosaceae</i>	<i>Acacia tortilis</i> var. <i>raddiana</i> (Savi) Brenan	15°58'30'' N et 15°17'9'' O

La composition biochimique de la litière des espèces végétales (Tableau 8) a été effectuée sur des échantillons séchés à l'air libre pendant 2 semaines, puis broyées et tamisées à 0,2 mm. La teneur en azote total a été mesurée par la méthode de Kjeldahl. Le carbone C soluble a été extrait en mélangeant 2 g de feuilles avec 60 ml d'eau froide pendant 2 heures. Le carbone extrait est alors dosé selon la méthode de la demande chimique en oxygène (COD) en utilisant la méthode HACH (Jirka & Carter, 1975). La lignine et la cellulose ont été analysées par digestion séquentielle de fibres (Van Soest, 1963). Les échantillons ont d'abord été extraits avec un détergent neutre. La lignocellulose («fibre au détergent acide» ou ADF) a été obtenu après extraction avec un détergent acide. La lignine («détergent acide lignine» ou ADL) a été obtenue après hydrolyse avec 72% de H₂SO₄. La cellulose a été déterminée par la différence ADF-ADL. Les phénols totaux ont été extraits avec 70% de méthanol puis mesurée par colorimétrie en utilisant la méthode de Folin-Ciocalteu (Marigo, 1973). L'azote total, les fibres, les phénols et les tannins solubles ont été analysés au laboratoire du Cirad (Centre de Coopération Internationale en Recherches Agronomiques pour le Développement, Montpellier, France).

Tableau 8. Caractéristiques biochimiques des litières des espèces ligneuses

Espèces ligneuses	Matière soluble	Cellulose	Lignine	Hémicellulose	N	Phénols Totaux
<i>Acacia senegal</i>	73,6	7,2	6,8	12,3	16,5	1,7
<i>Acacia tortilis raddiana</i>	66,0	10,2	13,6	10,2	14,2	5,4
<i>Balanites aegyptiaca</i>	70,4	7,7	10,4	11,5	10,4	1,1
<i>Boscia senegalensis</i>	63,7	13,8	6,6	15,9	11,7	1,7
<i>Sclerocarya birrea</i>	63,8	17,2	14,8	4,2	4,6	12,5

2.3. Dispositifs expérimentaux

2.3.1. Phénologie des espèces ligneuses

2.3.1.1. Mesures qualitatives

Le suivi phénologique des espèces a été réalisé par des observations qualitatives en utilisant les stades repères proposés par (Grouzis & Sicot, 1980) modifié. Les observations ont été réalisées tous les mois pendant deux ans, entre le mois de mars 2014 et le mois de mars 2016. Dix individus ont été choisis de manière aléatoire pour chaque espèce ligneuse au niveau de la station d'étude à Widou. Les échantillons étudiés sont issus de plantations dont les individus ont à peu près le même âge dans chacune d'elles. La distance entre les pieds d'arbres dans les parcelles est de 5 m. Les parcelles ont été mises en défens de manière totale donc, non perturbées et permettent un suivi sur plusieurs années. Trois phases ont été observées : la feuillaison, la floraison et la fructification. Chacune des phases est caractérisée par quatre stades phénologiques (Tableau 9).

Tableau 9. Phénophases, stades et caractéristiques correspondantes reconnues pour le suivi phénologique des espèces végétales (Grouzis & Sicot, 1980)

Phénophases	Stades	Caractéristiques
Feuillaison (V)	V1	bourgeons foliaires + feuilles épanouies (plus de 10 % et moins de 50 % des rameaux de l'individu)
	V2	majorité des feuilles épanouies
	V3	feuilles vertes + feuilles sèches ou ayant changé de couleur (plus de 10 % et moins de 50 %)
	V4	défeuillaison totale (0% de feuilles)
Floraison (f)	f1	bourgeons floraux et fleurs épanouies (plus de 10 % et moins de 50 %)
	f2	plus de 50 % des rameaux portent des fleurs épanouies
	f3	fleurs épanouies + fleurs sèches (plus de 10 % et moins de 50 %)
	f4	fin de floraison (0% de fleurs)
Fructification (F)	F1	phase d'évolution du fruit jusqu'à sa taille normale
	F2	maturité du fruit
	F3	fruit mûr + début de dissémination (ouverture des gousses, ou chute des fruits)
	F4	fin de fructification (0% de fruits)

2.3.1.2. Mesures quantitatives

L'étude du cycle phénologique peut se faire aussi par des mesures quantitatives car, tout individu peut porter plusieurs stades dont les fréquences cumulées valent 100%.

Le spectre phénologique, dans ce cas, est établi par calcul, pour chaque date d'observation des fréquences au sein de la population, des individus en phase de feuillaison (V%), de floraison (f%) et de fructification (F%) (Grouzis & Sicot, 1980). La relation est la suivante :

$$P(\%) = \frac{n_i}{N} 100$$

Avec P (%) : pourcentage d'individus du site présent aux diverses phases de feuillaison, de floraison ou de fructification ;

ni : nombre d'individus de la même espèce présentant un stade phénologique donné ;

N : nombre total d'individus (effectif de la population).

Une phase de développement est considérée comme étant atteinte pour un individu lorsqu'il présente l'un des 4 stades suivants : 1, 2, 3 et 4 (Tableau 10). C'est sur cette base que le spectre phénologique des cinq espèces végétales (*A. senegal*, *A. raddiana*, *B. aegyptiaca*, *B. senegalensis* et *S. birrea*) a été établi. Les paramètres examinés sont les pourcentages des individus en floraison, en feuillaison et en fructification.

Tableau 10. Cotation des stades phénologiques correspondant aux fréquences (Grouzis & Sicot, 1980)

Phénophases	Stades	Paramètres	Pourcentage
Feuillaison	1	nulle	0 %
	2	faible	1-20 %
	3	moyenne	20-60 %
	4	intense	> 60 %
Floraison	1	nulle	0 %
	2	faible	1-20 %
	3	moyenne	20-60 %
	4	intense	> 60 %
Fructification	1	nulle	0 %
	2	faible	1-20 %
	3	moyenne	20-60 %
	4	intense	> 60 %

2.3.2. La collecte des litières et le suivi de la décomposition

L'expérimentation a été réalisée sur le terrain afin de suivre la chute des litières (feuilles, brindilles, fleurs et fruits) sous-couvert des arbres. Le suivi de l'expérimentation a été effectué pendant un an, entre mars 2015 et mars 2016. Une placette de collecte de litière de 3 m² de surface a été mise en place sous-couvert de chaque arbre. Trois répétitions par traitement ont été utilisées, ce qui fait un total de 15 échantillons. Afin d'éviter le contact entre les litières avec le sol, un filet en nylon de type moustiquaire de 3 m² de surface a été posé à la surface du sol, tandis qu'un grillage de 40 cm de hauteur a été installé autour de la placette pour minimiser la perte de litière due au vent (Bernard-Reversat, 1993). Une bâche en plastique a été posée à la surface du sol afin de faciliter la récolte des litières. Le ramassage est effectué tous les 4 mois

pendant un an. La litière récoltée a été amenée au laboratoire, séchée à l'étuve à 65 °C pendant 72 heures pour la détermination du poids de la matière sèche. Le poids obtenu est exprimé en t MS/ha selon le calcul :

$$PI \text{ (t/ha)} = 0.033 \times 1g / 3m^2$$

L'expérience a été effectuée *in situ* afin de déterminer la dynamique de la perte de masse des litières. Il s'agit de la mise en décomposition des différentes litières contenues dans des sachets en nylon de 100 cm² (2 mm de maille), selon la technique de Bock & Gilbert (1957). Cette étude a été mise en place entre juin 2014 et octobre 2015. La maille de 2 mm de diamètre est considérée par Sundarapandian & Swamy (1999) comme suffisamment petite pour prévenir la perte de litière et suffisamment grande pour permettre l'accès de la macrofaune moyenne.

Dix grammes de litières sèches et intactes ont été introduits dans chaque sachet. Les sachets ont été disposés aléatoirement avec 30 sachets/ espèce/m² et enterrés à 10 cm de profondeur dans le sol durant toute la durée de l'expérience. Trois sachets / traitement ont été prélevés à 0, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 et 16 mois. Après prélèvement, les débris restants sont lavés à l'eau et séchés à l'étuve 60 °C pendant 72 heures, avant d'être pesés.

La perte de poids en pourcentage est évaluée par la formule suivante (Guo & Sims, 2001) :

$$Pm \text{ (\%)} = 100 \times (P_i - P_f) / P_i$$

P_i = poids initial des litières

P_f = poids des litières après prélèvement

2.3.3. Biomasse herbacée

Les mesures de biomasse ont été effectuées par échantillonnage, par coupe et enfin par pesage, en octobre 2015. Pour cela, l'herbe a été coupée à l'intérieur d'un carré de 1 m². Trois placettes ont été installées de manière aléatoire sous et hors-couverts de chaque arbre (Walker, 1987), ce qui multiplie l'échantillonnage par 9 pour chaque espèce, avec un total de 27 prélèvements. Le traitement hors-couvert constitue le Témoin. Après récolte, les échantillons ont été amenés au laboratoire, puis séchés à l'étuve et pesés. L'évaluation de la biomasse herbacée s'exprime en kilogramme de matière sèche par hectare (kg MS ha⁻¹).

2.3.4. Etude de la minéralisation de l'azote et de la biomasse microbienne

2.3.4.1. Prélèvement des échantillons de sol

L'objectif était de mesurer l'effet de différents arbres sur la dynamique de l'azote minéral et la biomasse microbienne. Pour cela, des mesures de biomasse microbienne et de teneurs en azote minéral, ainsi qu'une mesure de la minéralisation nette de l'azote organique ont été effectués sur des sols prélevés sous arbres comparés à des sols situés hors arbre.

Des arbres ont été aléatoirement choisis sur le site d'étude. Un espace hors-couvert constitue le témoin. Chaque traitement est constitué de 3 répétitions. La distance entre deux arbres est 10 m. Les échantillons de sol ont été prélevés au moyen d'une tarière entre 0 et 10 cm de profondeur en dehors et sous le houppier des arbres. Sous chaque arbre, quatre échantillons ont été prélevés selon quatre directions opposées à partir du tronc de l'arbre. Ces échantillons ont été mélangés pour former un échantillon composite. Les prélèvements ont été effectués en 2014 (mai, août, octobre) et janvier 2015.

2.3.4.2. Mesure de l'azote minéral et de la biomasse microbienne

Après prélèvement, les échantillons composites ont été apportés au laboratoire pour le dosage de l'azote minéral et de la biomasse microbienne.

L'expérience a été effectuée entre mai 2014 et février 2015. Elle a pour but de tester les effets des espèces végétales sur la minéralisation de l'azote et la biomasse microbienne. Les espèces ont été aléatoirement choisies au niveau du site. Un espace sans litière constitue le témoin. Chaque traitement est constitué de 3 répétitions. Le sol a été prélevé directement hors et sous houppiers des arbres entre 0 et 10 cm. Sous chaque arbre, les échantillons ont été prélevés selon quatre directions opposées à partir du tronc de l'arbre, au moyen d'une tarière. Ensuite, un échantillon composite de sol est constitué en mélangeant les échantillons obtenus dans les quatre directions de chaque arbre. Les prélèvements ont été effectués en 2014 : mai, août, octobre, et en janvier 2015. Après prélèvement, les échantillons ont été séparés en deux aliquotes : le premier a été apporté au laboratoire pour le dosage de l'azote minéral et la biomasse microbienne. Le deuxième a été incubé sur place en dehors des houppiers pendant 30 jours dans des pots en plastiques pour la détermination de la minéralisation nette de l'azote. Les résultats sont exprimés en $\mu\text{g N g}^{-1} \text{ sol}$.

2.3.4.3. Mesure de la minéralisation nette de l'azote organique du sol

Pour mesurer la minéralisation nette de l'azote organique du sol, la méthode décrite par Lemée (1967) a été appliquée. Environ 500 g de sol, ont été placés dans des tubes en plastique (225 ml et 7 cm de hauteur). Les pots sont recouverts par un tulle en Nylon et retenus par des attaches en plastique. Ils ont été « enterrés » entre 0 et 10 cm de profondeur dans une zone équivalente au lieu de prélèvement de l'échantillon testé. Ils ont été positionnés de telle sorte que la partie supérieure fermée est orientée vers le haut protégeant ainsi l'échantillon de l'introduction d'eau par la partie supérieure limitant le lessivage des nitrates. Les parois latérales des pots sont perforées pour permettre une bonne aération et une éventuelle humectation par capillarité. Après 30 jours, le sol contenu dans le pot était prélevé et la teneur en azote minéral et la biomasse microbienne ont été mesurées. La différence entre la teneur en azote minéral mesuré avant et après incubation constituait une évaluation de la minéralisation nette de l'azote organique. L'opération était alors répétée entre les mois de mai, août, octobre, et janvier 2015. Si la N minéralisation est négative alors on parle d'immobilisation, et si elle est positive alors on parle de minéralisation nette. Les résultats sont exprimés en $\mu\text{g N g}^{-1}$ sol.

2.3.5. Effet des espèces ligneuses sur la diversité des herbacées

Trois arbres ont été choisis de manière aléatoire pour chaque type d'arbres. De même, trois placettes de 9 m² ont été identifiées dans la partie hors couvert végétal pour constituer le témoin. Sous couvert des arbres, l'aire d'une placette d'inventaire correspond à la projection verticale du houppier au sol, soit une surface circulaire ne dépassant pas 50 m² (Akpo, 1993). La superficie de chaque houppier dépend du développement de la plante. Au total, 18 placettes ont été délimitées pour mener l'étude.

2.3.5.1. Diversité qualitative

L'analyse floristique qualitative (familles, genres et espèces) a été réalisée à partir de la liste floristique des différents inventaires. Une liste des espèces inventoriées a été établie. Les espèces rencontrées ont été identifiées à l'aide de la Flore du Sénégal (Berhaut, 1967). Les noms des espèces ont été actualisés sur la base d'ouvrages récents (Lebrun & Stork, 1997).

2.3.5.2. Diversité quantitative

L'approche quantitative concerne le calcul de l'indice de diversité beta et de la fréquence spécifique. Le coefficient de similitude (appelé aussi indice de diversité beta) de Sørensen (1948) a été choisi. Il permet de quantifier le degré de ressemblance de deux listes d'espèces de deux sites A et B.

Ce coefficient de similitude est obtenu par la formule suivante :

$$\beta = \frac{2C}{2C + S1 + S2}$$

S1 représente le nombre d'espèces d'une liste appartenant à un site 1 ; S2 est le nombre d'espèces d'une liste appartenant à un site 2 et C représente le nombre d'espèces communes aux deux sites (1 et 2). L'indice varie de 0 quand il n'existe aucune espèce commune entre les deux habitats, à 1 quand toutes les espèces rencontrées sont communes aux deux habitats.

En plus du coefficient de similitude, la fréquence spécifique d'une espèce (Fi) permet de mesurer la diversité quantitative. Celle-ci représente le nombre de points où cette espèce a été rencontrée (Lamotte, 1962). Elle s'obtient en faisant la somme des présences de chaque espèce dans chaque relevé; elle est une valeur absolue. Elle exprime la présence ou l'absence de l'espèce et est donnée par la formule suivante:

$$Fi = \frac{\text{Nombre de relevés dans les quels l'espèce est présente}}{\text{Nombre total de relevés}} \times 100$$

La similarité augmente avec la valeur de ces deux indices.

2.4. Analyses

2.4.1. Extraction de l'azote minéral

Vingt grammes d'échantillon de sol ont été placés dans des pots en plastique de 150 ml et fermés hermétiquement. 75 ml de solution de KCl (2M) ont été ajoutés à ce sol. Après une heure d'extraction par agitation, la suspension de sol a été laissée à décanter pendant une demi-heure environ. Dix millilitres d'extrait ont été ensuite prélevés à l'aide d'une seringue munie d'un filtre de 0.2 µm et récupérés dans des flacons à scintillation (Keeney & Nelson, 1982). Ces flacons ont été conservés à - 20 °C avant le dosage de la biomasse microbienne, de l'ammonium et du nitrate. Le dosage des échantillons s'est fait par colorimétrie sur une chaîne d'analyseur à flux continu segmentés (Evolution II, Alliance Instruments, France) avec des réactifs spécifiques.

2.4.2. Dosage de la biomasse microbienne totale

La biomasse microbienne a été déterminée par la méthode de Fumigation Extraction (Amato & Ladd, 1988). Cette méthode repose sur le dosage de l'azote alpha- aminé des parois bactériennes. Cet azote a été dosé par colorimétrie avant (T0) et après une incubation de 10 jours (T10) d'un échantillon de 20 g de sol humide dans un milieu saturé en chloroforme (= fumigation). La différence entre les deux (T10 - T0) représente l'azote alpha aminé apparu au cours de la fumigation et provenant de la lyse des microorganismes du sol tués par le

chloroforme. Cette quantité d'azote alpha aminé est fonction de la quantité de microorganismes présents dans le sol avant la fumigation. La réaction colorée est basée sur la formation d'un composé de couleur pourpre qui se forme lorsque l'azote est mis en présence de réactif à la ninhydrine. La lecture de la densité optique se fait à la longueur d'onde de 570 nm à pH 5,5. La quantité de C présent dans la biomasse a été calculée en multipliant le gain d'azote alpha aminé libéré lors de l'incubation par le facteur 21 (Amato & Ladd, 1988). Les résultats sont exprimés en $\mu\text{g C g}^{-1}$ sol.

La valeur de l'azote microbien par échantillon de sol est obtenue à partir de la formule suivante :

$$N_m = ((N_{T10} - N_{T0}) * 75) / (P - (P * H))$$

N_m = azote microbien ($\mu\text{g/g}$ de sol sec).

N_{T0} = azote α -aminé mesuré dans les extraits KCL au temps T_0 ($\mu\text{g N ml}^{-1}$).

N_{T10} = azote α -aminé mesuré dans les extraits KCL après incubation de 10 jours ($\mu\text{g N ml}^{-1}$).

P = Poids de l'échantillon frais (g).

H = humidité de l'échantillon (%) = $(\text{Poids frais} - \text{Poids sec}) * 100 / \text{Poids sec}$.

2.4.3. Dosage colorimétrique de l'ammonium

Le dosage colorimétrique de l'azote ammoniacal a été réalisé par la réaction de Berthelot modifiée au bleu d'indophénol. Le magnésium, ainsi que les métaux comme l'aluminium, le fer, le titane qui pourraient interférer sur le dosage ont été complexés par un mélange EDTA et de tartrate double de sodium et de potassium. Le maximum de coloration pour la réaction avec l'indophénol s'obtient à un pH compris entre 10 et 13 (Bremner, 1965). Plutôt que le phénol (toxique), nous avons utilisé le salicylate de sodium et l'eau de Javel est remplacée par le dichloroisocyanurate de sodium. La réaction de Berthelot donne une coloration bleue à la longueur d'onde 660 nm. Les résultats sont exprimés en $\mu\text{g N g}^{-1}$ sol.

Trois réactifs sont utilisés pour le dosage colorimétrique :

Réactif 1: EDTA + Tartrate double de sodium et de potassium + NaOH + Brij35

Réactif 2: Salicylate de sodium + Nitroprussiate

Réactif 3: Dichloroisocyanurate de sodium

La courbe étalon est obtenue à partir d'une solution mère de sulfate d'ammonium à 1g l^{-1} .

2.4.4. Dosage colorimétrique du nitrate

Le dosage du nitrate a été réalisé par réduction en nitrite puis réaction colorée avec la sulfanilamide en milieu acide pour former un composé « diazo » avec le N-1 naphthyléthylène

diamine dichlorohydrate (réactif de GRIESS). Le nitrate a été séparé des matières organiques des extraits par dialyse. La coloration rose a été mesurée à la longueur d'onde 525 nm. Les résultats sont exprimés en $\mu\text{g N g}^{-1}$ sol (Bremner, 1965).

Trois réactifs sont utilisés pour le dosage colorimétrique

Réactif 1 = sulfanilamide + Acide phosphorique concentré + N-1 naphthyléthylène diamine dichlorohydrate.

Réactif 2 = soude en pastilles + Brij 35.

Réactif 3 = solution de sulfate d'hydrazine + solution de sulfate de cuivre.

Le dosage colorimétrique s'est fait à partir d'une gamme étalon obtenue grâce à une solution de KNO_3 à 1 g l^{-1} . La gamme proprement dite est composée de 6 points à partir desquels nos solutions ont été étalonnées. Ces points de gamme correspondent aux solutions-filles de 0, 2, 4, 6, 8, et 10 mg de $\text{N-NO}_3 \text{ l}^{-1}$.

2.4.5. Analyse statistique

Tous les tests ont été effectués à un taux de 5% de signification. Pour tester la régression et la différence de l'azote minéral ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ et $\text{NO}_3^-\text{-N}$), la biomasse microbienne et la minéralisation nette entre les échantillons de sols sous les différentes espèces d'arbres, une analyse à deux voies de la variance (ANOVA), a été utilisée avec le logiciel SAS Software Version 9.4.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Les hypothèses habituelles de l'homogénéité des variances et de la normalité ont été vérifiées à l'aide des tests statistiques de Bartlett's et de Shapiro-Wilk. Les données ont été transformées en cas de besoin. Pour analyser le modèle de différence entre les moyennes, l'ANOVA est suivie par des comparaisons spécifiques, et le plus couramment utilisé consiste à comparer deux moyennes (les soi-disant «comparaisons appariées»). La comparaison des moyennes des traitements a été effectuée avec le test de Fisher PLSD ($P \leq 0,05$) pour l'analyse des données de l'azote minéral, la biomasse microbienne, la décomposition des litières, la perte de masse et la biomasse herbacée.

Une analyse factorielle des correspondances (AFC) a été réalisée sur le tableau de contingence présence/absence de chaque plante ligneuse, dans chaque placette (Cibois, 2006) pour l'étude de la diversité spécifique des herbacées. L'objectif de cette méthode est de représenter un ensemble de points caractérisés par de nombreuses variables dans un espace à peu de dimensions, avec un minimum de perte d'information (Bottlikova *et al.*, 1976).

Chapitre III : Résultats

3.1. Caractérisation de la variabilité des stades phénologiques des cinq espèces ligneuses

(Article parue dans la Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie, 27: 117-137, Juin 2016)

3.1.1. Variation intraspécifique de la phénologie des espèces ligneuses

Les résultats globaux sur la variation des stades phénologiques au cours du temps, ont montré que la perte des feuilles pour la majorité des espèces est notée entre les mois de janvier et février, la phase de bourgeonnement entre les mois de juin et d'août et la feuillaison entre les mois de septembre et décembre (Tableau 11). Par contre, les phases de défloraison et de fructification varient selon les espèces avec un pic en janvier. L'évolution de la phase végétative de l'*A. senegal* débute en juin. La pleine feuillaison est située entre les mois d'août et de novembre. Concernant la floraison, elle a lieu entre les mois d'août et de décembre et à partir du mois de janvier, l'espèce commence à perdre ses feuilles. En outre, la phase de fructification a lieu entre les mois d'octobre et de mai. Pour *A. tortilis* var. *raddiana*, la phase végétative est située entre les mois de juillet et de décembre et la phase de floraison entre les mois de juin et de novembre. Les résultats de nos observations révèlent aussi des phases de fructification variables entre les individus de l'*A. tortilis* var. *raddiana*. Cela est visible par la non uniformisation de la période de floraison entre les pieds d'*A. tortilis* var. *raddiana*.

La phase végétative pour *B. aegyptiaca* est située entre les mois de juin et de février. Il y aussi une grande variabilité entre individus en ce qui concerne les phases de floraison et de fructification. Par ailleurs, *B. senegalensis* maintient ses feuilles toute l'année à l'exception du mois de septembre ; il en est de même pour la phase de fructification qui est absente au mois d'octobre. Les observations ont montré aussi une grande diversité en ce qui concerne la phase de floraison. Pour *S. birrea*, la phase végétative est située entre les mois de mars et de décembre, la phase de floraison entre les mois d'avril et d'août, et la phase de fructification est située entre les mois de février et d'août.

Résultats

Tableau 11. Evolution des stades phénologiques des espèces ligneuses au cours du temps (n=10 individus)

Espèces ligneuses	Caractéristiques	Stades phénologiques	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	
<i>Acacia senegal</i>	Phase végétative (feuillaison)	V1													
		V2	■	■											
		V3					■								■
		V4	■	■	■	■	■								
	Floraison	f1													
		f2									■	■	■	■	■
		f3	■	■	■	■	■	■	■	■					
		f4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Fructification	F1													
		F2											■	■	■
		F3	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		F4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
<i>Acacia tortilis raddiana</i>	Phase végétative (feuillaison)	V1													
		V2	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		V3													■
		V4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Floraison	f1	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		f2													
		f3	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		f4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Fructification	F1	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		F2													
		F3													
		F4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
<i>Balanites aegyptiaca</i>	Phase végétative (feuillaison)	V1													
		V2	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		V3													
		V4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Floraison	f1	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		f2													
		f3	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		f4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Résultats



*les couleurs indiquent les caractéristiques des phases : vert pour la feuillaison, marron pour la floraison et orange pour la fructification

3.1.2. Variations interspécifique de la phénologie des espèces ligneuses

3.1.2.1. Phase végétative

L'analyse de la Figure 5 montre que la phase végétative des espèces s'étale toute l'année. Un maximum d'individus a atteint les 100% de feuillaison entre les mois d'avril et d'août, avec un pic en novembre. Entre les mois de Février et de mars et en septembre, on note une défeuillaison totale chez certaines espèces.

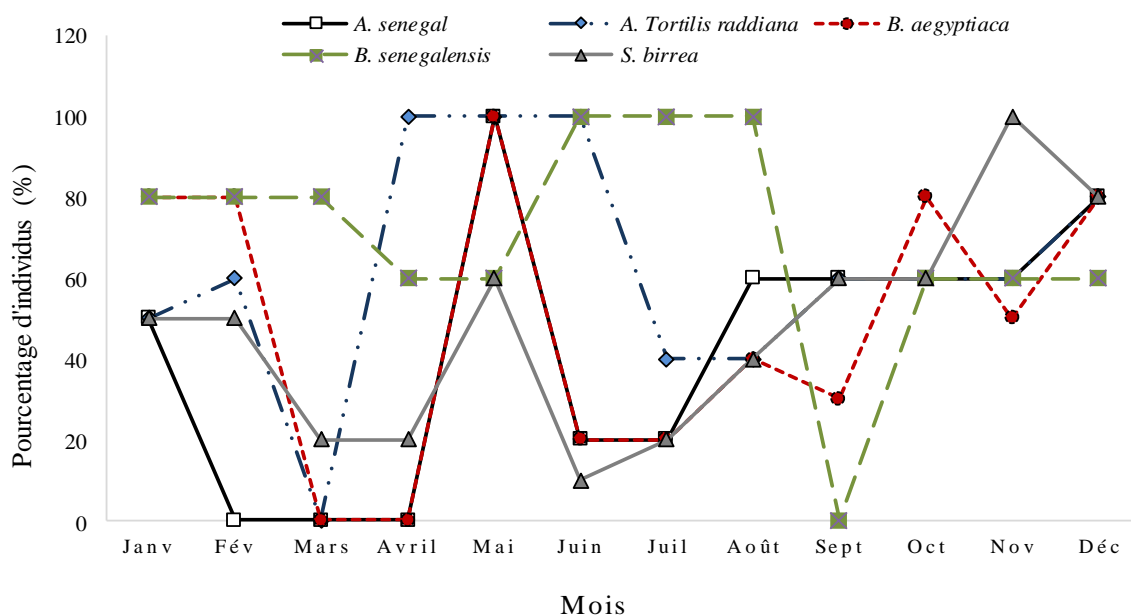


Figure 5. Variation de la phase végétative des espèces ligneuses

3.1.2.2. Phase de floraison

La phase de floraison varie aussi selon les espèces. On observe une floraison élevée entre les mois d'avril et de juin, en août, septembre, et entre les mois d'octobre et de décembre (Figure 6). Entre les mois de janvier et de mars, on observe une chute des fleurs notamment chez *A. senegal*, *S. birrea* et *B. aegyptiaca*.

Résultats

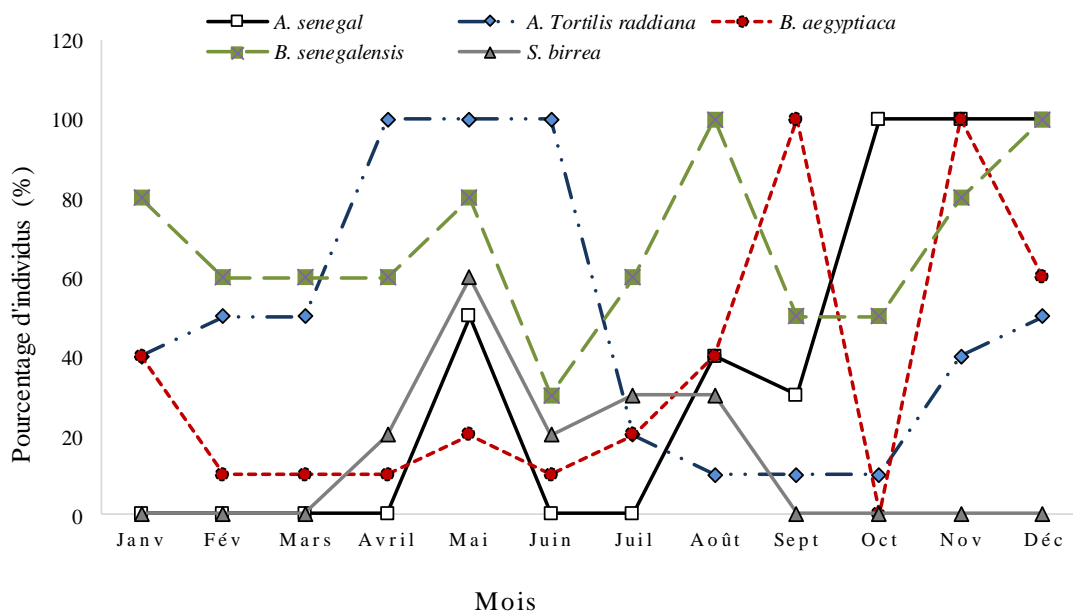


Figure 6. Variation de la phase de floraison des espèces ligneuses

3.1.2.3. Phase de fructification

La phase de fructification varie aussi selon les espèces et s'étale sur toute l'année (Figure 7). L'espèce *A. senegal* est en pleine fructification en pleine saison sèche entre les mois de janvier et de mai contrairement aux autres espèces qui atteignent leur pleine fructification en saison pluvieuse entre les mois de juin et d'octobre.

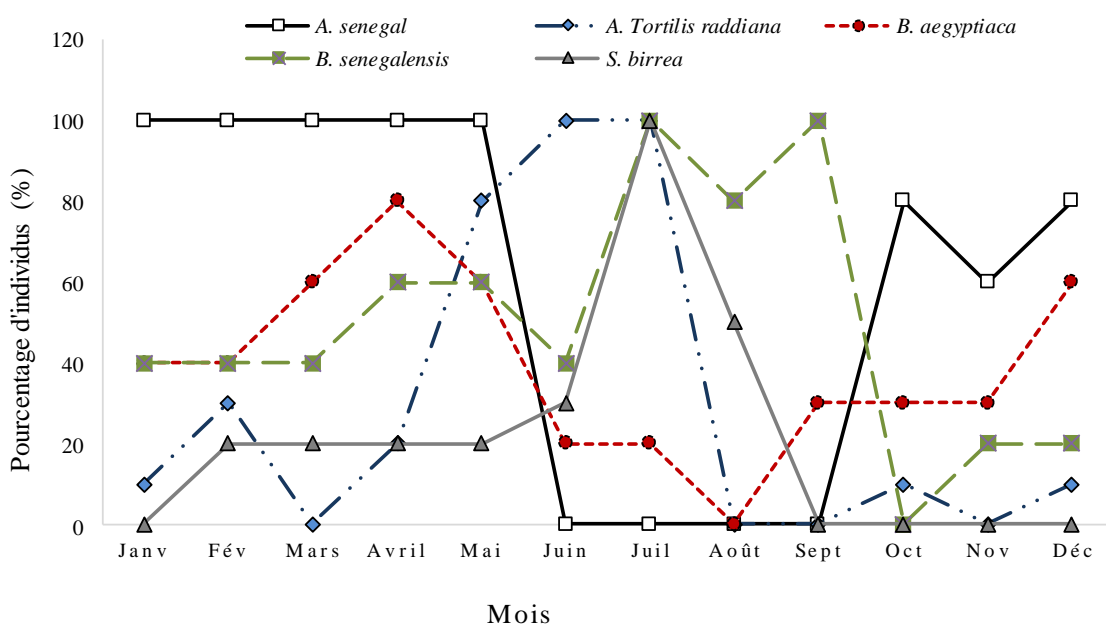


Figure 7. Variation de la phase de fructification des espèces ligneuses

Conclusion partielle

Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude nous ont permis de caractériser les différentes phénophases de cinq espèces végétales sahéliennes dans le Nord Ferlo du Sénégal. Les résultats ont montré une différence significative intraspécifique et interspécifique. La variabilité observée s'explique en grande partie par la diversité et les fluctuations des conditions climatiques et environnementales.

L'hypothèse H_1 de l'étude, selon laquelle, la phénologie des espèces ligneuses dépend des conditions environnementales (température et pluviométrie), ne pourrait pas être vérifiée à ce stade. Il faut d'autres études complémentaires pendant plusieurs années pour définir de manière certaine le déterminisme des phases phénologiques des cinq espèces ligneuses retenues.

3.2. Chute et décomposition de la litière des cinq espèces ligneuses et leur influence sur la biomasse herbacée

3.2.1. La collecte des litières

Les résultats de l'apport annuel de litières (feuilles, brindilles, fleurs et fruits) des espèces ligneuses ont montré que la chute de litière varie selon les traitements et qu'elle s'étale le long de l'année (Figure 8). Le résultat statistique de l'analyse de variance a montré que les quantités de litières sous *B. senegalensis* (39,3 t ha⁻¹) étaient significativement plus élevées que celles des autres espèces ligneuses ($P \leq 0,05$). Il s'en suit, les quantités enregistrées sous *S. birrea* (15,79 t ha⁻¹) et *Boscia senegalensis* (15,76 t ha⁻¹). Les plus faibles quantités ont été enregistrées sous *A. tortilis* var. *raddiana* (7,89 t ha⁻¹) et *A. senegal* (4,73 t ha⁻¹).

Les quantités de litières collectées en début de saison sèche (entre le mois de novembre 2015 et le mois de mars 2016) étaient supérieures à celles collectées en fin de saison sèche (entre le mois mars et le mois de juillet 2015). La production de litière est très faible pendant la saison pluvieuse, entre le mois de juillet et le mois de novembre 2015, sauf pour l'espèce *B. senegalensis* qui a un apport élevé durant cette période de l'année.

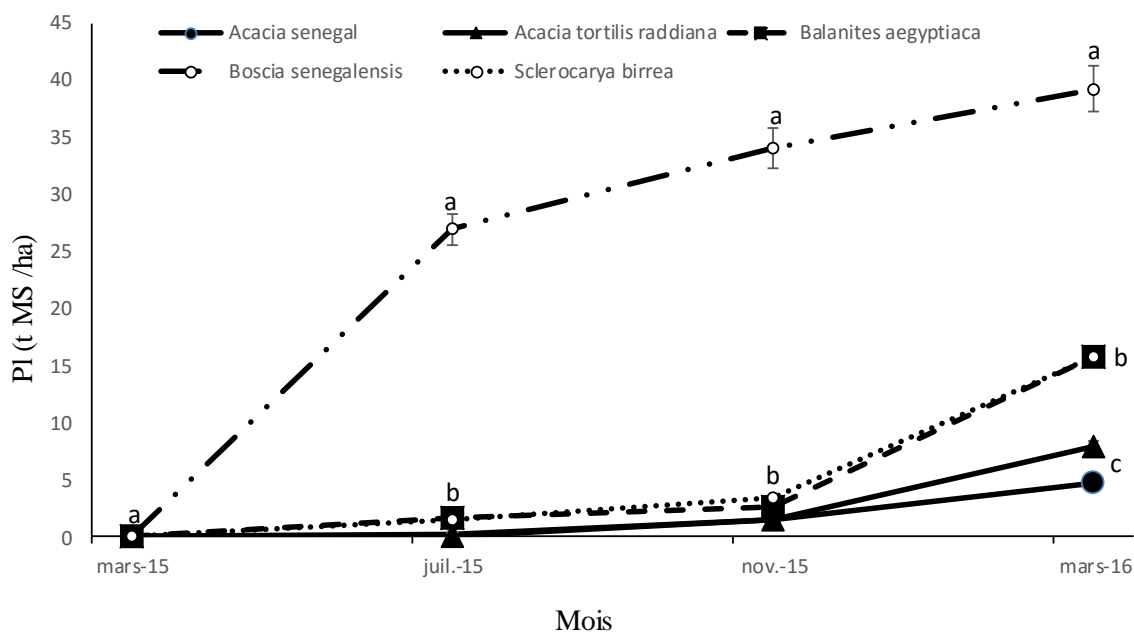


Figure 8. Apport annuel de litières (feuilles, brindilles, fleurs et fruits) par les différentes espèces ligneuses (t MS/ha). Les barres représentent les écarts types, les lettres de même type ne sont pas significativement différentes selon le test de Fisher LSD ($P \leq 0,05$; $n=3$). (MS : matière sèche).

3.2.2. Pourcentage de perte de masse des litières

Le pourcentage de perte de masse des litières évolue de manière exponentielle et varie selon les espèces ligneuses (Figure 9). La perte de masse des litières est assez faible les premiers mois (juin - septembre 2014) et il n'y a pas de différence significative ($P \leq 0,05$). C'est à partir de la fin de la saison pluvieuse, en octobre 2014, que la décomposition s'accélère pour toutes les litières. Par ailleurs, on note un ralentissement en janvier 2015. A la fin de l'expérimentation, en octobre 2015, le pourcentage de perte de masse des litières est assez élevé et varie différemment selon les espèces. Le pourcentage le plus élevé est noté chez l'*A. tortilis* var. *raddiana* (70%), suivi de l'*A. senegal* (65%) et de *B. senegalensis* (61%). Le pourcentage le plus faible est enregistré chez *S. birrea* (44%) et *B. aegyptiaca* (52%).

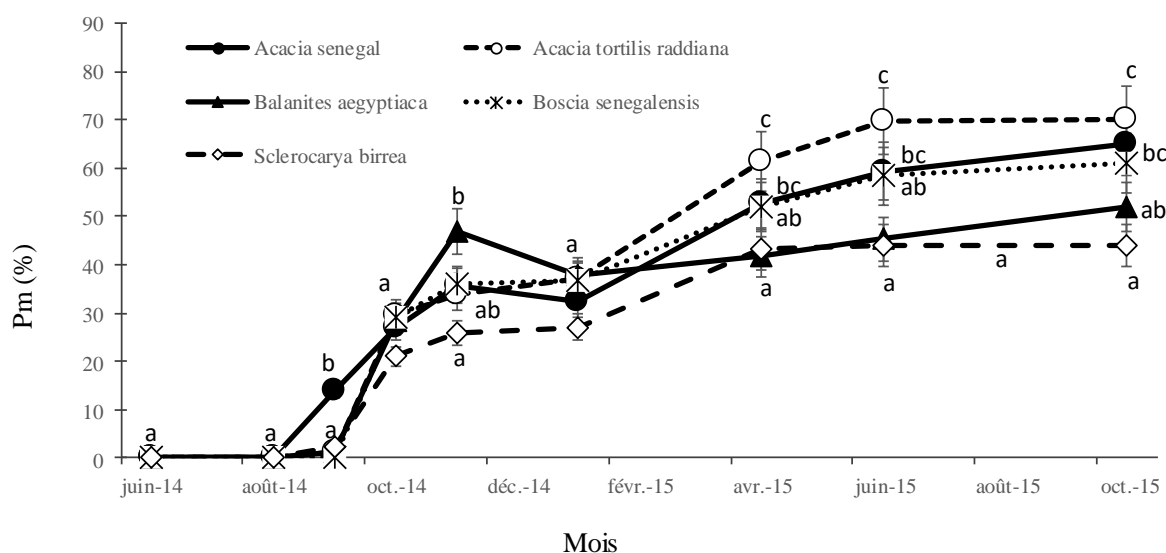


Figure 9. Décomposition des litières au cours du temps. Les barres représentent les écarts types, les lettres de même type ne sont pas significativement différentes selon le test de Fisher LSD ($P \leq 0,05$; $n=3$).

Une analyse multivariée a été effectuée sur l'ensemble des résultats de décomposition en corrélation avec les mesures de qualité des litières (Tableau 12). Les résultats ont montré une corrélation positive entre l'azote organique des litières et la décomposition en fin d'expérimentation ($P \leq 0,05$) et entre les phénols totaux et le début de la décomposition. La corrélation est non significative (NS) à $P \leq 0,05$ pour la matière soluble, la lignine et la cellulose avec la perte de masse des litières.

Tableau 12. Coefficient de Régression (valeurs de R) entre les caractéristiques biochimiques des litières et la décomposition au cours du temps

Caractéristiques des litières	sept-14	oct-14	nov-14	janv-15	avr-15	juin-15	oct-15
Matière soluble	0,117	0,701	0,354	0,811	0,929	0,969	0,669
Cellulose	0,395	0,247	0,146	0,311	0,749	0,624	0,354
Lignine	0,487	0,409	0,461	0,533	0,895	0,771	0,53
Hémicellulose	0,927	0,089	0,301	0,142	0,589	0,465	0,289
N	0,345	0,14	0,542	0,337	0,193	0,128	0,030*
Phénols totaux	0,737	0,049*	0,047*	0,107	0,765	0,61	0,34

*Significatif à $P \leq 0,05$

3.2.3. Caractérisation de la biomasse herbacée

L'évaluation de la biomasse herbacée a montré une quantité de phytomasse significativement plus élevée sous-couvert que hors-couvert ($P \leq 0,05$) (Figure 10). La biomasse est plus élevée chez *B. senegalensis* ($73,5 \text{ kg MS ha}^{-1}$) suivi de *B. aegyptiaca* ($65,47 \text{ kg MS ha}^{-1}$) et plus faible chez le témoin ($28,97 \text{ kg MS ha}^{-1}$).

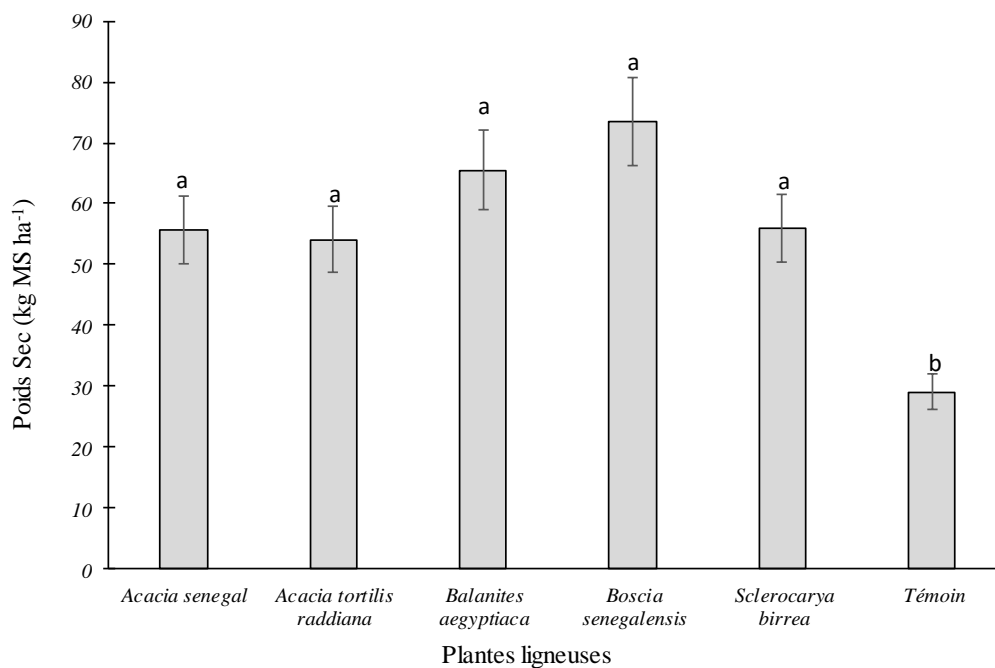


Figure 10. Biomasse des herbacées. Les barres représentent les écarts types, les lettres de même type ne sont pas significativement différentes selon le test de Fisher LSD ($P \leq 0,05$; $n=3$).

Conclusion partielle

Les résultats de cette étude ont permis de suivre la décomposition et la physiologie des espèces ligneuses traitées et leur effet sur la composition floristique des herbacées. Deux espèces ligneuses (*B. aegyptiaca* et *B. senegalensis*) se sont distinguées par leur action plus marquées par rapport aux autres (*Acacia tortilis* var. *raddiana*, *A. senegal* et le témoin).

L'hypothèse H3 qui stipule que, la décomposition de la matière organique dépend de leur qualité biochimique a été vérifiée par cette étude.

Ces résultats donnent des indications sur la production de ces espèces ligneuses, ce qui devrait permettre aux populations de mieux situer les périodes de récolte des fleurs et de prendre les mesures d'entretien nécessaires pour favoriser la fructification des espèces.

3.3. Influence des espèces ligneuses sur la minéralisation de l'azote et la biomasse microbienne

3.3.1. Dynamique de l'azote minéral

La quantité d'azote minéral ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ et $\text{NO}_3^-\text{-N}$) a été mesurée sous et hors-couvert des arbres à quatre dates précises (Tableau 13). Cette quantité varie en fonction du type d'arbres et elle est significativement plus élevée sous-couvert que hors-couvert quel que soit l'espèce ($P \leq 0,05$). Il a été noté aussi qu'à certaines périodes, la concentration en $\text{NO}_3^-\text{-N}$ est plus élevée que celle de $\text{NH}_4^+\text{-N}$. Lors du premier prélèvement en mai 2014, la concentration en nitrate est significativement plus élevée sous *B. senegalensis* ($11,17 \mu\text{g g}^{-1}$ sol) et la concentration la plus faible est enregistrée au niveau du témoin ($4,93 \mu\text{g g}^{-1}$ sol). Concernant l'ammonium, il n'y a pas différence significative entre les différentes espèces ($P \leq 0,05$) quel que soit la date. Les analyses de sols effectués en août 2014, ont montré des concentrations en ammonium plus élevées chez *B. senegalensis* ($22,84 \mu\text{g g}^{-1}$ sol) et chez *B. aegyptiaca* ($31,50 \mu\text{g g}^{-1}$ sol) par rapport au témoin ($6,29 \mu\text{g g}^{-1}$ sol). En octobre 2014, *B. senegalensis* a la plus grande concentration en azote minéral ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ et $\text{NO}_3^-\text{-N}$). En janvier 2015, les concentrations en N minéral deviennent faibles pour tous les traitements et elles ne sont pas significativement différentes ($P \leq 0,05$) par rapport au témoin sauf pour *B. aegyptiaca* pour NH_4^+ et *B. senegalensis* et *S. birrea* pour le NO_3^- . Pour tous les traitements, les résultats indiquent une variation différente de la concentration de N minéral au cours du temps. *B. aegyptiaca* et *B. senegalensis* se sont distingués des autres arbres concernant la dynamique de N minéral.

3.3.2. Minéralisation nette de l'azote organique du sol

Les flux nets d'azote sont obtenus après une incubation du sol prélevé sous et hors-couvert des arbres pendant un mois sur le terrain et sont déterminés par la soustraction de l'azote minéral obtenu à T30 jours de l'azote minéral trouvé à T0 jour au début de l'incubation (Tableau 14). La description des résultats de minéralisation montre qu'une minéralisation nette apparaît sur la période de septembre avec une tendance à une minéralisation nette positive plus élevés sous *B. senegalensis* ($16,26 \mu\text{g N g}^{-1}$ sol) et *S. birrea* ($16,13 \mu\text{g N g}^{-1}$ sol). De même on observe des périodes de minéralisation nette en juin et novembre 2014. Par contre, en février 2015, il y a une forte immobilisation de l'azote minéral notamment chez *B. aegyptiaca* ($-19,43 \mu\text{g N g}^{-1}$ sol) et chez *B. senegalensis* ($-12,13 \mu\text{g N g}^{-1}$ sol). Les mêmes tendances ont été observées chez *B. senegalensis* en juin ($-8,15 \mu\text{g N g}^{-1}$ sol) et *S. birrea* en novembre ($-3,62 \mu\text{g N g}^{-1}$ sol).

Résultats

Tableau 13. Azote minéral (NH₄⁺-N et NO₃⁻-N) (µg N g⁻¹ sol) sous et hors-couvert des arbres

Espèces ligneuses	Mai 2014		Août 2014		Octobre 2014		Janvier 2015	
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
	(µg N g ⁻¹ sol)							
<i>Acacia tortilis raddiana</i>	6,70±0,85 bc	11,06±5,17 a	8,84±1,05 bc	9,93±1,31 bc	7,77±2,49 b	7,14±3,43 b	9,97±2,87 b	8,97±6,47 ab
<i>Acacia senegal</i>	8,98±1,21 abc	12,46±3,79 a	6,77±0,78 c	13,55±0,45 bc	8,20±1,68 b	6,21±3,06 b	7,47±3,15 b	2,73±2,05 b
<i>Balanites aegyptiaca</i>	10,40±1,26 ab	17,14±3,99 a	13,82±2,50 b	31,50±11,17 a	6,39±0,49 b	6,35±4,00 b	23,4±4,50 a	11,73±2,05 ab
<i>Boscia senegalensis</i>	11,17±5,35 a	15,09±6,22 a	22,84±6,69 a	16,37±0,68 b	22,68±9,25 a	31,22±8,56 a	11,23±1,69 ab	24,80±3,35 a
<i>Sclerocarya birrea</i>	7,77±0,46 abc	9,41±2,03 a	11,21±6,67 bc	17,72±4,74 b	7,18±1,50 b	16,40±7,08 ab	7,17±2,00 b	14,37±10,36 a
Témoin	4,93±0,65 c	1,34±0,69 b	6,29±0,50 c	4,83±2,64 c	5,55±0,55 b	2,39±1,58 b	8,9±4,86 b	2,60±1,71 b

*ammonium (NH₄⁺-N), nitrate (NO₃⁻-N). Les bars représentent les écarts-types. Les valeurs ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Fisher LSD (P ≤ 0,05; n=3).

Tableau 14. Azote minéral net (NH₄⁺-N et NO₃⁻-N) (µg N g⁻¹ sol)

Espèces ligneuses	Juin 2014		Septembre 2014		Novembre 2014		Février 2015	
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
	(µg N g ⁻¹ sol)							
<i>Acacia tortilis raddiana</i>	1,11±0,66 a	-0,47±1,50 abc	0,26±2,95 a	4,02±9,50 a	0,76±0,64 a	0,95±3,39 a	-0,8±1,31 a	-4,17±6,02 ab
<i>Acacia senegal</i>	1,91± 2,97 a	2,09±0,96 ab	0,66±3,15 a	7,18±0,59 a	0,71±0,67 a	0,70±0,54 a	-0,8±1,35 a	1,83±1,10 a
<i>Balanites aegyptiaca</i>	0,37±3,79 a	-6,35±8,11 bc	0,86±12,13 a	10,02±2,91 a	0,98±0,32 a	2,70±2,09 a	-8±5,54 b	-4,13±2,5 a
<i>Boscia senegalensis</i>	-0,92±2,51 a	-7,23±7,35 c	4,84±13,60 a	11,42±11,61 a	0,13±1,78 a	0,21±5,47 a	-1,63±1,36 a	-17,80±29,99 b
<i>Sclerocarya birrea</i>	1,66±0,44 a	4,6±1,95 a	-2,54±7,18 a	18,67±24,76 a	0,74±0,57 a	-4,39±6,29 a	0,77±3,59 a	-2,40±9,64 a
Témoin	1,2±1,14 a	-0,06±0,67 abc	-1,10±0,17 a	6,25±1,75 a	0,49±0,23 a	-0,06±0,57 a	-1,9±1,57 a	-0,20±0,30 a

*ammonium (NH₄⁺-N), nitrate (NO₃⁻-N). Les bars représentent les écarts-types. Les valeurs ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Fisher LSD (P≤0,05; n=3).

3.3.3. Biomasse microbienne

Les biomasses microbiennes contenues dans les sols variaient significativement selon le type d'arbre sur les prélèvements réalisés en juin, septembre et janvier. Les biomasses microbiennes les plus faibles sont mesurées sous *B. senegalensis* (Figure 11A). En mai 2014, elle est plus élevée sous l'*A. senegal* (31,76 mg C kg⁻¹ sol) et plus faible sous *B. senegalensis* et le témoin (17 mg C kg⁻¹ sol). Au mois d'août 2014, il n'y a pas de différence significative entre les traitements ($P \leq 0,05$). Par contre, en octobre 2014 et janvier 2015, nous avons une biomasse plus élevée respectivement chez l'*A. senegal* (49 mg C kg⁻¹ sol) et *B. aegyptiaca* (53,67 mg C kg⁻¹ sol).

Concernant la biomasse microbienne après un mois d'incubation *in situ*, il y a une évolution similaire au cours du temps même si les quantités diffèrent (Figure 11B). En juin 2014, après un mois d'incubation dans les pots, on observe que la biomasse microbienne a diminué chez l'*A. senegal* (-11 mg C kg⁻¹ sol) et *B. aegyptiaca* (-1 mg C kg⁻¹ sol) contrairement à *B. senegalensis* qui montre une augmentation de la biomasse microbienne sur 30 j d'incubation (23,67 mg C kg⁻¹ sol). Au cours de la période d'août 2014, la biomasse microbienne du sol augmente quel que soit l'espèce sans qu'aucune différence n'apparaisse entre celles-ci (entre 16 et 20 mg C kg⁻¹ sol). Les différences entre biomasse microbienne avant et après incubation sont proches de 0 pour la période novembre 2014. En revanche elles sont toutes négatives à la fin de l'expérimentation en février 2015 sauf pour le témoin qui est proche de 0.

Résultats

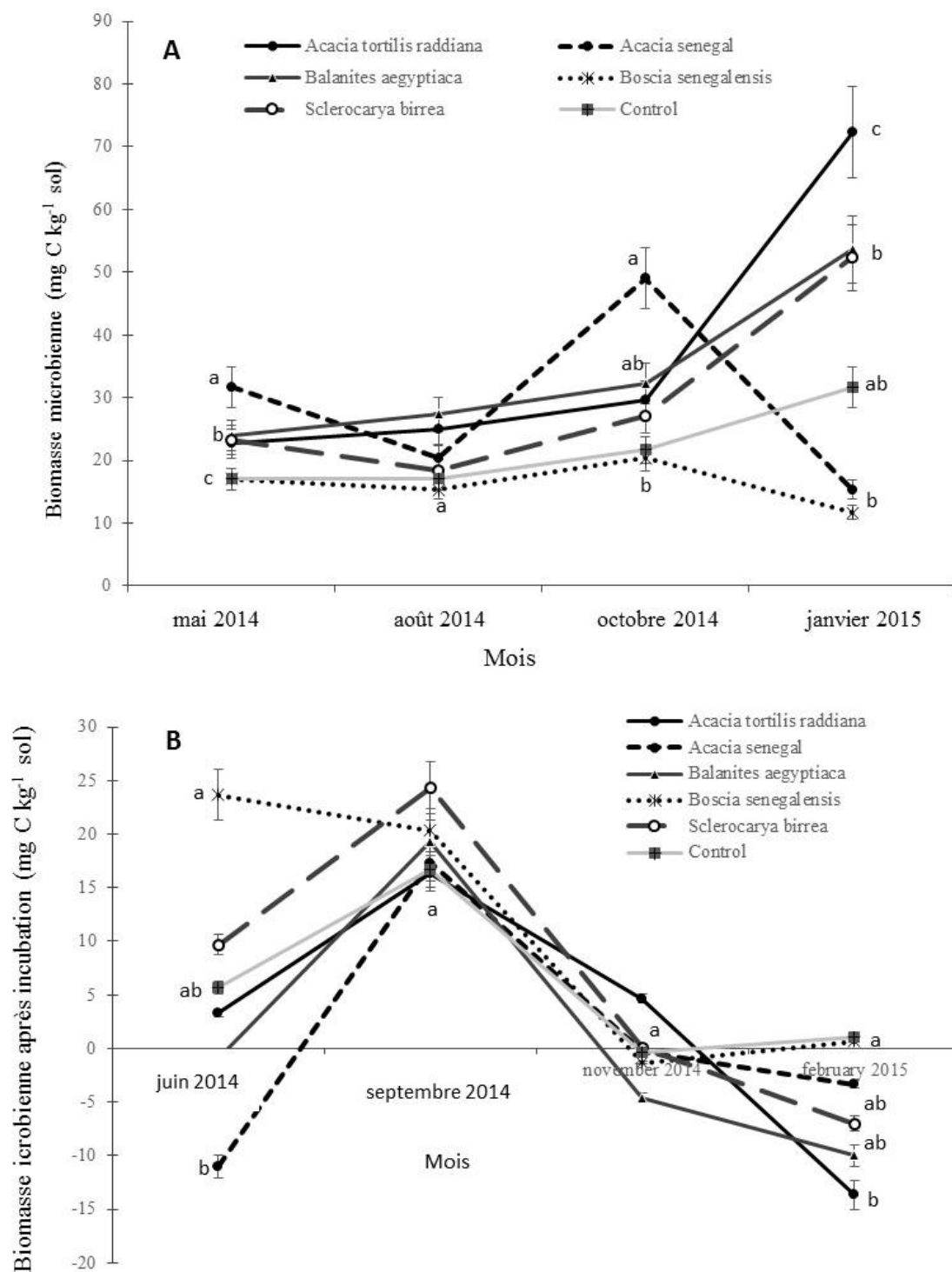


Figure 11. Biomasse microbienne (A) et biomasse microbienne après un mois d'incubation (B). Les bars représentent les écarts-types. Les valeurs ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Fisher LSD ($P \leq 0,05$; $n=3$).

3.3.4. Analyse en Composante Principal (PCA)

La Figure 12 montre que le plan factoriel F1 et F2 contient l'essentiel de l'information. L'axe F1 apporte 37,36% de l'information réelle, correspond à un gradient de concentration $\text{NH}_4^+\text{-N}$, avec des valeurs élevées sur la droite. L'axe F2, apporte 28,72% de l'information réelle, correspond à un gradient de $\text{NO}_3^-\text{-N}$.

Nous avons trois classes distinctes : une classe à *B. aegyptiaca*, une classe à *B. senegalensis* et une classe à *A. tortilis raddiana*-*A. senegal*-*S. birrea*-Control. Sur l'axe positif de F1, *B. senegalensis* contribue à hauteur de 68,47% et sur l'axe positif de F2, *B. aegyptiaca* contribue à 47,21%.

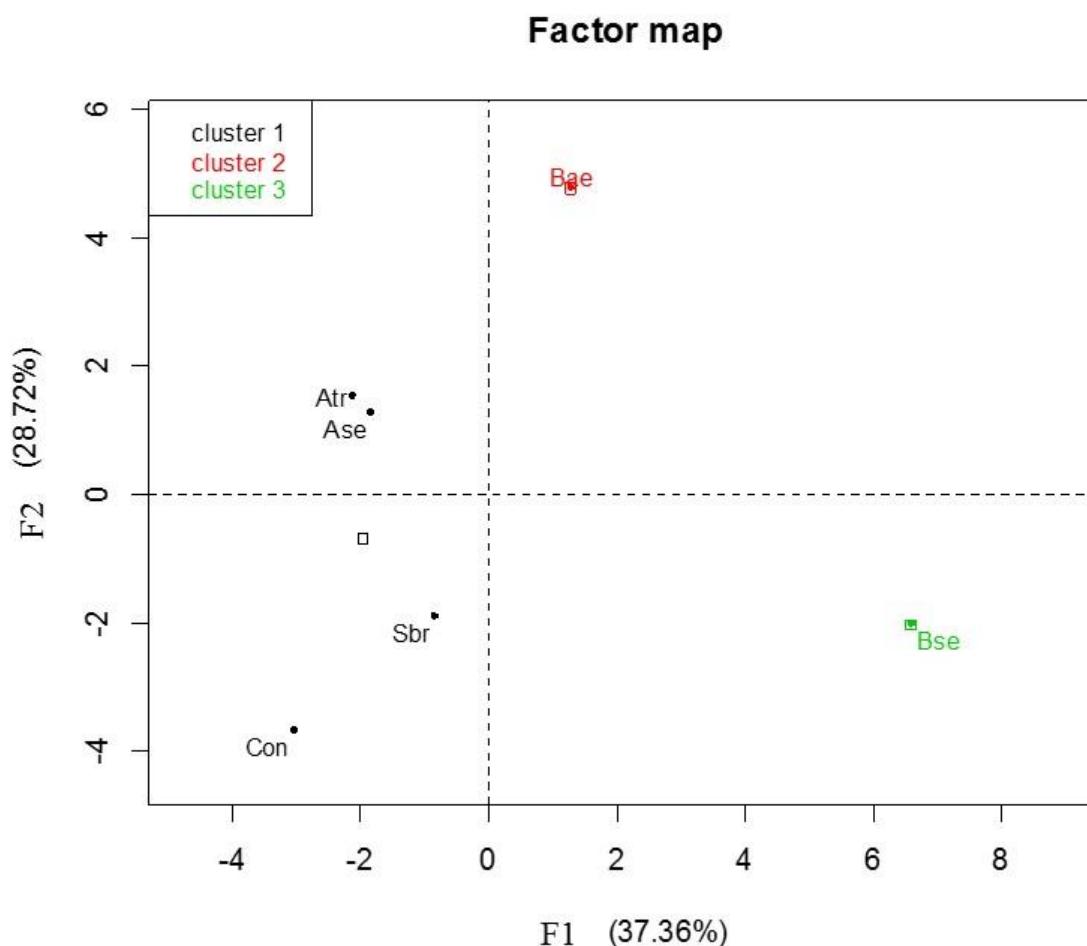


Figure 12. Analyse en Composantes Principales (ACP) entre les espèces ligneuses, la biomasse microbienne and et l'azote minéral du sol (NH_4^+ et NO_3^-). Ase: *Acacia senegal* ; Atr: *Acacia tortilis raddiana* ; Bae: *Balanites aegyptiaca* ; Bse: *Boscia senegalensis* ; Str: *Scerocarya birrea* ; Con: témoin.

3.3.5. Coefficient de corrélation

Une analyse multivariée a été effectuée sur l'ensemble des résultats en corrélation avec les mesures de qualité des litières (Tableau 15). Les résultats ont montré une corrélation positive entre la lignine et l'hémicellulose, et l'azote minéral net ($P \leq 0,05$). La corrélation est non significative (NS) à $P \leq 0,05$ pour les autres caractéristiques des litières, l'azote minéral et la biomasse microbienne.

Table 15. Coefficient de corrélation (valeurs de R) entre les caractéristiques biochimiques des litières, l'azote minéral, l'azote minéral net, la biomasse microbienne et la biomasse microbienne après incubation

Caractéristiques des litières	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	N minéral	Biomasse microbienne	NH ₄ ⁺ -N net	NO ₃ ⁻ -N net	N mineral net	Biomasse microbienne après incubation
Matière soluble	0,693	0,422	0,526	0,181	0,507	0,880	0,738	0,723
Cellulose	0,912	0,492	0,660	0,159	0,516	0,728	0,597	0,164
Lignine	0,313	0,574	0,448	0,699	0,926	0,029*	0,050*	0,621
Hémicellulose	0,197	0,530	0,367	0,734	0,907	0,023*	0,048*	0,751
N	0,919	0,474	0,652	0,701	0,675	0,489	0,591	0,536
Phénols totaux	0,350	0,772	0,576	0,744	0,686	0,125	0,085	0,785

*Significatif à $P \leq 0,05$

Conclusion partielle

Les résultats de cette étude montrent que :

- les espèces végétales, grâce à leur litière (feuilles, fruits et branches), constituent une source importante d'azote minéral dont la disponibilité dans le sol dépend du type de plante.
- la disponibilité de l'azote minéral in situ ne peut être expliquée par les rapports classiques de composés biochimiques des litières apportées au sol (C soluble, Lignine, N, polyphénols, cellulose, hémicellulose).
- au niveau des sols ferrugineux lessivés, la teneur en biomasse microbienne varie aussi selon l'espèce et le sous et hors houppiers.
- parmi les arbres testés, *B. senegalensis* et *B. aegyptiaca* se sont distingués quant à leur influence sur le N minéral et la biomasse microbienne.

Résultats

L'hypothèse H₂ selon laquelle la disponibilité de l'azote minéral dans le sol pourrait dépendre aussi bien du type de matière organique apportée au sol que des conditions environnementales, a été partiellement vérifiée par les résultats obtenus dans cette étude.

Les résultats de cette étude peuvent servir lors de la restauration d'un milieu dégradé ou d'un reboisement mixte avec des arbres tels que ceux utilisés dans cette étude.

3.4. Influence des espèces ligneuses sur la diversité floristique des herbacées

(Article parue dans la revue Int. J. Biol. Chem. Sci. 9(2): 803-814, Avril 2015)

3.4.1. Analyse factorielle des correspondances (AFC)

L'analyse factorielle des correspondances montre que le plan factoriel F1 et F2 contient l'essentiel de l'information. En effet, les axes factoriels apportent des informations qui varient de 0,38 (axe F1) à 0,06 (axe F5) soit de 39,24% à 6,02%. Les quatre (04) premiers axes ont une information supérieure à la moyenne (Tableau 16). L'axe F1 apporte 39,24% de l'information réelle, les autres axes significatifs (F2, F3 et F4) fournissent respectivement 24,09%, 19,63% et 11,02%. Donc ces quatre axes absorbent à eux seuls 93,98% de l'inertie totale.

Tableau 16. Valeurs propres et pourcentage d'inertie des quatre premiers axes de l'AFC

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	0,38	0,24	0,19	0,11	0,06
Inertie (%)	39,24	24,09	19,63	11,02	6,02
% cumulé	39,24	63,33	82,96	93,98	100

L'analyse a été faite sur le plan factoriel formé par les axes F1-F2 (Figure 13). Ces deux axes apportent à eux seuls 63,33% de l'information. Toutefois, les plans factoriels définis par F1 et les autres axes (F3 et F4) ont été considérés et nous ont aidés à confirmer cette analyse.

La contribution des relevés sous ligneux (points colonnes) varie de 48,9 à 4,8% et 60,7 à 0,0% et celle des espèces herbacées (points lignes) de 7,4 à 1,2% et 12,0 à 0,0% respectivement pour les axes F1 et F2. La contribution moyenne est de 16,7% pour les relevés sous ligneux et 5,0% pour les espèces herbacées. Seuls les relevés ligneux et/ou espèces herbacées ayant une contribution supérieure à la moyenne, ont été utilisés pour la définition des axes F1 et F2.

L'AFC a permis de mettre en évidence quatre groupements végétaux.

- Le groupement à *Boscia-A. raddiana*-Témoin qui regroupe *B. senegalensis*, *A. tortilis* var. *raddiana* et le témoin ;
- Le groupement à *B. aegyptiaca*;
- Le groupement à *A. senegal* ;

Résultats

- Le groupement à *S. birrea*.

Ainsi l'axe F1 discrimine les relevés sous *B. aegyptiaca* (abscisses positives) et les relevés sous Témoin, *B. senegalensis* et *A. raddiana* (abscisses négatives). Les relevés sous *B. aegyptiaca* sont associés aux groupes d'espèces herbacées telles que *Chloris barbata*, *Datura metel*, *Cyperus esculentus*, *Eragrostis pilosa*, *Senna obtusifolia*, *Cucumis melo*, *Tribulus terrestris*, tandis que ceux sous Témoin, *B. senegalensis* et *A. tortilis* var. *raddiana* sont formés par les espèces herbacées *Corchorus tridens*, *Zornia glochidiata*, *Alysicarpus ovalifolius* et *Schoenefeldia gracilis*.

Par contre, dans les coordonnées positives de l'axe F2, nous retrouvons les relevés sous *Balanites aegyptiaca* qui s'opposent dans les coordonnées négatives aux relevés sous *Sclerocarya birrea* associés aux herbacées *Aristida adsentionis*, *Achyranthes aspera* et *Brachiaria ramosa*.

L'analyse du plan factoriel F1 x F3 montre une opposition nette entre les relevés sous *B. senegalensis* et les relevés sous *A. senegal*. Cette dernière est associée aux herbacées comme *Gisekia pharmacoides*, *Enteropogon prieurii* et *Heliotropium strigosum*.

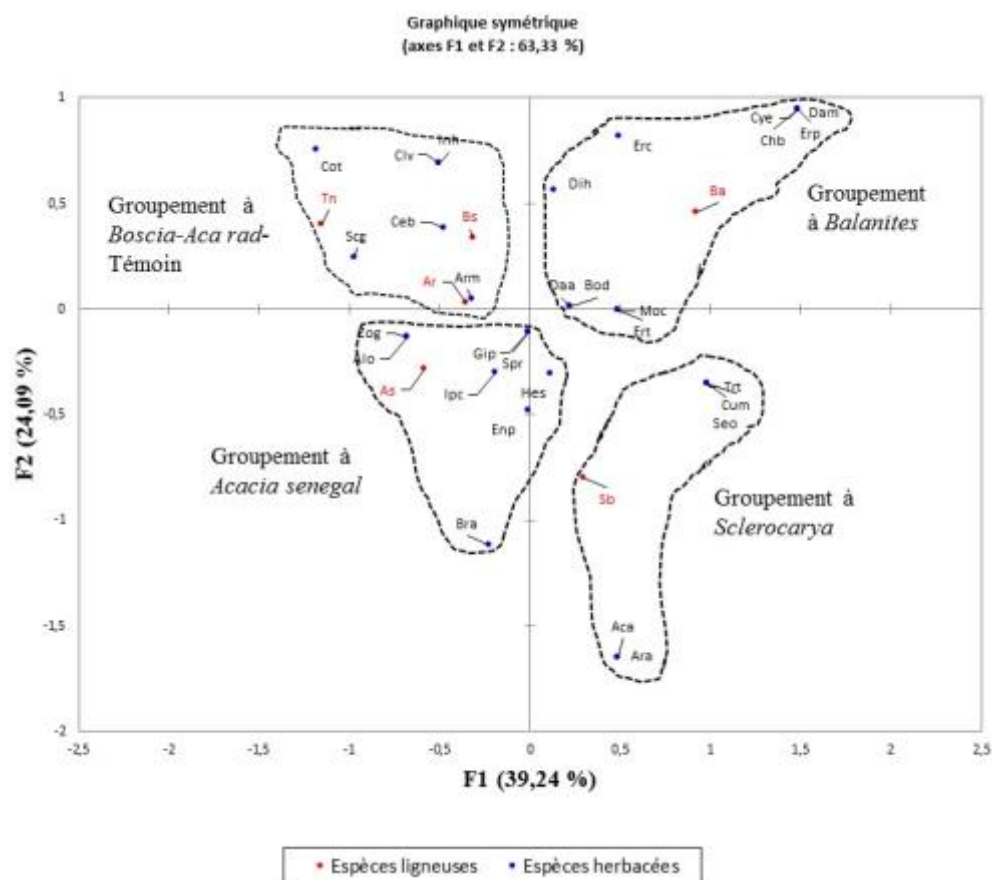


Figure 13. Diagramme des relevés et des espèces herbacées sur le plan factoriel (F1 et F2)

3.4.2. Inventaire floristique

L'étude a permis de dénombrer 28 espèces végétales herbacées qui se répartissent entre 25 genres et 15 familles. *Boscia senegalensis*, *Balanites aegyptiaca* et *Sclerocarya birrea* possèdent la flore la plus riche avec 18 espèces chacune. *Acacia tortilis* et *Acacia senegal* ont respectivement 12 et 9 espèces. Le témoin est le moins riche avec 6 espèces (Tableau 17). Parmi les espèces inventoriées, la famille des Poacées domine la flore avec 9 genres et 12 espèces, suivie de la famille des Fabacées avec 3 genres et 3 espèces, puis celle des Convolvulacées avec 2 genres et 2 espèces, les 12 autres familles sont représentées que par une espèce. Les résultats ont montré aussi que *Aristida mutabilis* est la seule espèce qui a été répertoriée dans tous les relevés tandis que la présence des autres espèces sous les houppiers et le témoin sont variables.

Tableau 17. Liste des espèces herbacées inventoriées sous les houppiers des arbres

Familles	Espèces herbacées	A. senegal	A. raddiana	B. aegyptiaca	B. senegalensis	S. birrea	Témoin
<i>Aizoaceae</i>	<i>Gisekia pharmacoides</i> L.	x	x	x	x	x	
<i>Amaranthaceae</i>	<i>Achyranthes aspera</i> var. <i>argentea</i> (Lam.) C.B.Clarke					x	
<i>Boraginaceae</i>	<i>Heliotropium strigosum</i> Willd.	x	x	x		x	
<i>Capparaceae</i>	<i>Cleome viscosa</i> L.				x		
<i>Cesalpiniaceae</i>	<i>Senna obtusifolia</i> L.			x		x	
<i>Convolvulaceae</i>	<i>Cucumis melo</i> var. <i>agrestis</i> Naudin			x		x	
	<i>Ipomoea coptica</i> (L.) Roth ex Roem. & Schult.		x		x	x	
<i>Cucurbitaceae</i>	<i>Momordica charantia</i> L.			x	x	x	
<i>Cyperaceae</i>	<i>Cyperus esculentus</i> L.			x			
<i>Fabaceae</i>	<i>Alysicarpus ovalifolius</i> (Schumach. & Thonn.) J.Léonard	x	x		x	x	x
	<i>Indigofera hirsuta</i> L.				x		
	<i>Zornia glochidiata</i> Rchb. ex DC.	x	x		x	x	x
<i>Nyctaginaceae</i>	<i>Boerhavia diffusa</i> L.		x	x	x	x	
<i>Poaceae</i>	<i>Aristida adsentionis</i> L.					x	
	<i>Aristida mutabilis</i> Trin. & Rupr.	x	x	x	x	x	x
	<i>Brachiaria ramosa</i> (L.) Stapf	x				x	
	<i>Cenchrus biflorus</i> Roxb.	x	x	x	x		x
	<i>Chloris barbata</i> Sw.			x			
	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) Willd.		x	x	x	x	

Résultats

	<i>Digitaria horizontalis</i> Willd.		x	x	x		
	<i>Enteropogon prieurii</i> Kunth				x	x	
	<i>Eragrostis ciliaris</i> (L.) R.Br.			x	x		
	<i>Eragrostis pilosa</i> (L.) P.Beauv.			x			
	<i>Eragrostis tremula</i> (Lam.) Hochst. ex Steud.			x	x	x	
	<i>Schoenefeldia gracilis</i> Kunth	x	x		x		x
<i>Rubiaceae</i>	<i>Spermacoce ruelliae</i> DC.	x	x	x	x	x	
<i>Solanaceae</i>	<i>Datura metel</i> L.			x			
<i>Tiliaceae</i>	<i>Corchorus tridens</i> L.				x		x
<i>Zygophyllaceae</i>	<i>Tribulus terrestris</i> Auct.			x		x	

3.4.3. Indice de diversité

Les valeurs de l'indice de similitude de Sorensen (Tableau 18) ont montré que la majorité des relevés ont moins de 50% de ressemblance à l'exception de la similitude entre *A. senegal* et *A. tortilis* (0,67), celle entre *A. senegal* et le témoin (0,64) et enfin celle entre *A. raddiana* et *B. senegalensis* (0,56). La similitude la plus faible est celle entre *S. birrea* et *B. aegyptiaca* avec le témoin (0,09). La moyenne de similitude de tous les relevés est de 0,39 montrant ainsi que les parcelles ne sont pas très similaires.

Tableau 18. Indice de similitude de Sorensen (1948) entre les différents relevés des espèces ligneuses

	<i>Acacia senegal</i>	<i>Acacia raddiana</i>	<i>Balanites aegyptiaca</i>	<i>Boscia senegalensis</i>	<i>Sclerocarya birrea</i>
<i>Acacia raddiana</i>	0,67				
<i>Balanites aegyptiaca</i>	0,24	0,36			
<i>Boscia senegalensis</i>	0,35	0,56	0,38		
<i>Sclerocarya birrea</i>	0,35	0,43	0,44	0,44	
Témoin	0,64	0,38	0,09	0,33	0,14

3.4.4. Fréquence de présence

La variation de la fréquence de présence des herbacées dans les différents relevés (Figure 14) a montré que *Aristida mutabilis* est l'espèce la plus fréquente (100% de présence), suivie de *Alysicarpus ovalifolius*, *Cenchrus biflorus*, *Gisekia pharmacoides*, *Spermacoce ruelliae* et *Zornia glochidiata* qui ont une fréquence élevée (83,33 %). Par contre, les autres espèces sont les moins fréquentes (16,67%).

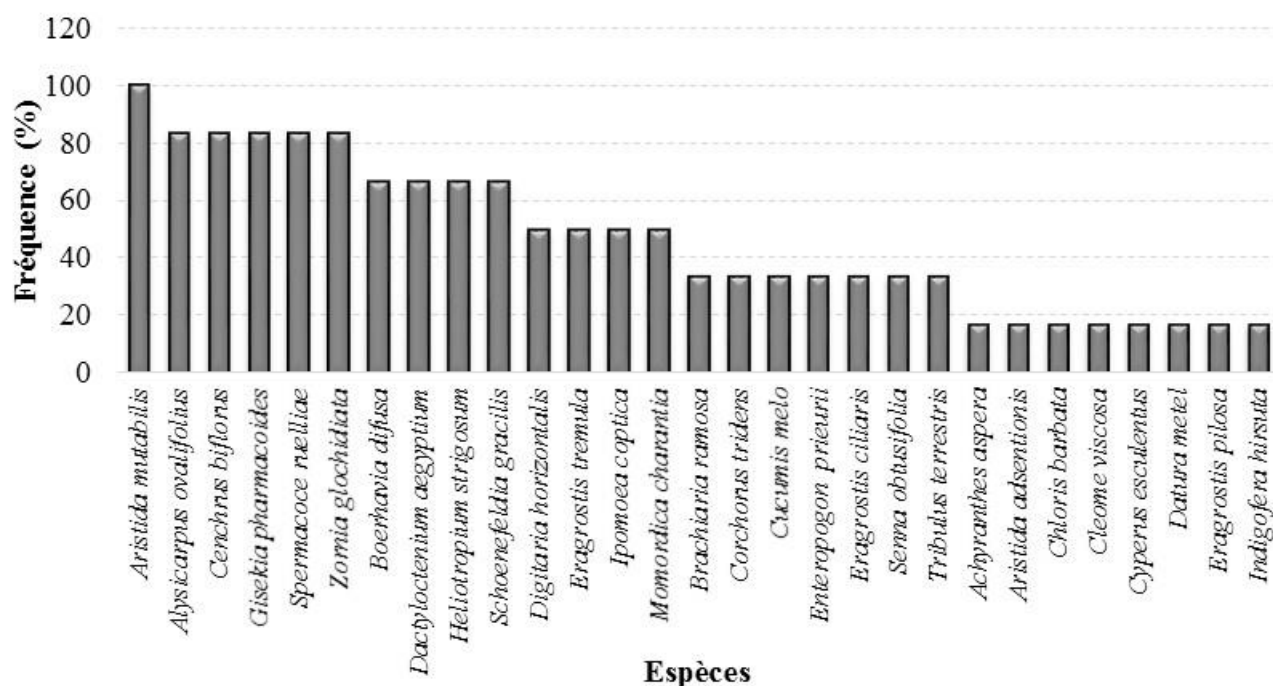


Figure 14. Variation de la fréquence de présence (%) des différentes espèces herbacées recensées

Conclusion partielle

L'objectif de cette étude était de suivre l'effet de cinq plantes ligneuses sur la diversité floristique des herbacées dans la GMV du Ferlo au Sénégal. Au terme de cette étude, l'inventaire floristique, sous couvert et hors couvert des arbres, a permis de connaître la composition floristique en herbacées et d'évaluer les indices de diversité floristique et leur fréquence.

La strate herbacée est composée de 28 espèces réparties dans 25 genres et 15 familles. Les espèces *Boscia senegalensis*, *Balanites aegyptiaca* et *Sclerocarya birrea* possèdent la flore la plus riche avec 18 espèces chacune. *Acacia tortilis* et *Acacia senegal* ont respectivement 12 et 9 espèces.

Chapitre IV : Discussion générale

Au vu des résultats de ce travail, ce chapitre est séparé en 8 parties. Les premières parties traitent du fonctionnement des cinq espèces ligneuses (*Acacia senegal*, *Acacia tortilis* var. *raddiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis* et *Sclerocarya birrea*). Ensuite la discussion s'oriente sur leur influence sur le sol en l'occurrence la minéralisation de l'azote et la biomasse microbienne et enfin sur leur effet sur la croissance végétale à travers la diversité spécifique de la biomasse herbacée.

4.1. Variabilité des stades phénologiques

Les différents paramètres étudiés ont permis de déceler une variabilité des Phénophases chez les cinq espèces ligneuses. En effet, les résultats ont montré qu'en 2014, la saison des pluies était tardive et déficitaire, ce qui a entraîné un faible pourcentage des arbres à avoir normalement l'ensemble des trois phases phénologiques contrairement à l'année 2015 où les pluies sont tombées tôt, avec abondance. De ce fait, la durée de la feuillaison, floraison et fructification paraît également variable avec l'abondance et la répartition des pluies. Les travaux de Yadav & Yadav (2008) ont montré les effets visibles des conditions climatiques sur 26 plantes ligneuses dont *A. senegal* dans le Nord-ouest de l'Inde. Ces auteurs ont noté une grande différence entre les différentes phases phénologiques en fonction des saisons sèche et pluvieuse avec une action plus visible à la saison sèche liée à la photopériode. D'autres auteurs, comme Jaouadi *et al.* (2012) en Tunisie et Diouf & Zaafouri (2003) au Sénégal et en Tunisie, ont caractérisé la variabilité d'amplitude et de position dans le temps des Phénophases de *A. tortilis* var. *raddiana* en fonction des conditions édapho-climatiques. Ils ont conclu que les phases de feuillaison et de floraison dépendent de la température, de l'humidité et des heures d'insolation, car, l'augmentation de ces paramètres permet le déclenchement de la feuillaison et de la floraison.

L'analyse plus fine des Phénophases des espèces, à travers la succession des 4 stades phénologiques observées, a montré un chevauchement des stades intermédiaires au cours du temps. En effet, on observe quelque fois un chevauchement entre un début de feuillaison couplé à une chute des premières feuilles, un début de floraison couplée avec une défeuillaison totale et enfin fructification en phase d'évolution couplée à une maturation des fruits ou une fin de fructification notamment chez *B. senegalensis* et *S. birrea*. Ces différences pourraient s'expliquer par une variabilité entre individus (Piot *et al.*, 1980). Selon Grouzis & Sicot (1980) cette variabilité intraspécifique peut être la réponse de l'organisme, dans les limites fixées par son génotype, aux fluctuations des facteurs du milieu (hétérogénéité spatiale du substrat par exemple), ou au contraire le résultat d'une différenciation génotypique.

Les travaux de Ndoye *et al.* (2004) au Sénégal sur la phénologie de *B. aegyptiaca* sont confirmés par nos résultats sur certains aspects phénologiques comme la feuillaison et la floraison. Ils ont montré que la phase de feuillaison était située entre les mois de mai et de décembre, et la phase de floraison était très hétérogène. Par ailleurs, les travaux de Diouf & Zaafouri (2003) ont mis en évidence la précocité significative des populations nord-sahariennes de l'*A. tortilis* var. *raddiana* pour les phases de floraison et de fructification. En plus des conditions climatiques, la différence entre les stades intermédiaires d'une même espèce, pourrait s'expliquer aussi par le fait que les différents individus sont issus de sujets de tailles et d'âge différents (Depommier, 1998). Ce même auteur a montré que chez *Faidherbia albida*, une feuillaison quasi équivalente entre classes de circonférence - et donc d'âge - quelle que soit la période. De même, les travaux de Poupon (1979) ont montré que *Commiphora africana* ne commence à porter des fleurs que lorsque la circonférence du tronc atteint 28 à 30 cm, ce qui correspond à 8-9 cernes d'accroissement, et que ces limites varient avec l'élément du relief et l'année. Ils ont noté aussi que l'âge n'intervient pas uniquement sur l'acquisition de la fonction de reproduction, mais encore sur le développement végétatif tel que le débourrement. L'influence du taux d'humidité relative de l'air et des réserves hydriques du sol sur la phénologie a été démontrée par Depommier (1998) sur *F. albida*, Marie-Alain (2005) et Jaouadi *et al.* (2012) sur *A. tortilis* var. *raddiana*. Pour ces derniers, la floraison est la phase la plus tributaire des facteurs environnementaux surtout l'insolation et l'évaporation.

4.2. Les collectes des litières

L'apport annuel des arbres en litières (feuilles, brindilles, fleurs et fruits) a montré que, parmi les espèces ligneuses, *B. senegalensis* produisait le plus de litière. Cela s'explique par le feuillage qui est présent pendant toute l'année et une production très élevée de fruits. Une telle production résulte de la croissance rapide de cette espèce. Les quantités de litières des espèces arrivées au sol sont assez élevées et supérieures à celles observées par certains auteurs. Il s'agit des résultats de travaux de Gnahoua *et al.* (2013) sur quatre espèces de légumineuses arborées en Côte d'Ivoire, des résultats de Zakra (1997) sur un peuplement de l'*Acacia spp* de 5 ans et les travaux de Goma-Tchimbakala *et al.* (2005) qui ont étudié la chute annuelle de litière de *Terminalia superba* dans des peuplements de 7 et 12 ans au Congo.

Les pics de production de litières qui se situent exclusivement dans les périodes sèches montrent que la chute des feuilles est liée aux variations climatiques. Selon Gnahoua *et al.* (2013), le stress hydrique prononcé en saison sèche est responsable de la forte chute des feuilles. D'autres études ont montré des résultats similaires. Les travaux de Morellato (1992) ont montré que la

chute de litières était sous la dépendance des facteurs climatiques avec des pics en saison sèche (Goma-Tchimbakala *et al.*, 2005) ou pendant la saison pluvieuse (Schwartz, 1993). Selon D'Annunzio (2008), la chute des litières pendant la saison sèche serait due au stress hydrique conduisant à la cavitation, puis l'embolie des feuilles et l'abscission des feuilles des arbres et à un mécanisme de remplacement des vieilles feuilles concomitant avec à l'élaboration de nouvelles. Les feuilles constituent la plus grande partie de la production totale de litière comme l'ont constaté d'autres auteurs (Lugo *et al.*, 1990 ; Morellato, 1992).

L'intérêt de la quantification des litières présentes au sol est de déterminer la vitesse de décomposition de celles-ci.

4.3. Décomposition des litières

La différence du taux de perte de masse des litières des espèces ligneuses présentées dans cette étude est sans doute concomitante à un ensemble de facteurs inhérents à la qualité de la litière. Mais aussi aux conditions environnementales comme la pluviométrie qui influence le développement de décomposeurs. Selon Grayston & Prescott (2005), des changements de communautés ont lieu au cours du processus de décomposition et en rapport avec la qualité des résidus. Les travaux de Diallo *et al.* (2015b), sur cinq espèces végétales sahéliennes, ont montré que la perte de masse des litières varie en fonction de leur qualité biochimique. Nos travaux ont montré que seul l'azote en fin de décomposition et les phénols au début, avaient une influence sur la décomposition de la matière organique. Des études antérieures ont révélé des résultats similaires sous l'effet de résidus en décomposition (Trinsoutrot *et al.*, 2000). Les travaux de Berg & Mc Clougherty, (2008) et de Freitas *et al.*, (2011), ont montré que le taux de décomposition était influencé par la composition biochimique des litières et les facteurs climatiques notamment la température et la pluviométrie. Parmi les facteurs biochimiques, les phénols (Diallo *et al.*, 2015c), l'azote (N) (Heal *et al.*, 1997), les taux de C/N et lignine /N (Bonanomi *et al.*, 2010) sont des prédicteurs de décomposition.

L'accélération de la dégradation des litières en octobre 2014 serait due à la l'influence de l'humidité occasionnée par la pluie et aux fortes températures qui sont des facteurs favorables à l'activité et au développement des décomposeurs. Les travaux de Fioretto *et al.* (2007) ont montré que l'humidité est un facteur primordial permettant la régulation de nombreuses activités microbiennes. Par ailleurs, le ralentissement noté en janvier 2015 peut être dû à la forte dessiccation. A la fin de l'expérimentation, le pourcentage le plus élevé de perte de masse des litières a été observé chez *A. tortilis* var. *raddiana* et le plus faible chez *S. birrea* et *B.*

aegyptiaca. Cette différence est due selon certains auteurs à une différence des caractères morphologiques des litières (épaisseur et rigidité) ou bien à la qualité biochimique des litières qui influencent leur décomposition (Guo & Sims, 1999 ; Torreta & Takeda, 1999).

4.4. Biomasse des herbacées

Il ressort de l'étude de la production de biomasse, que le poids obtenu est plus élevé sous couvert que hors couvert. La présence d'arbres a entraîné une amélioration de la production de la quantité de biomasse quel que soit le type d'arbre. Les travaux de Coughenour *et al.*, (1990) et Grouzis & Akpo (2003) sur l'*A. tortilis* var. *raddiana* en zone sahélienne, ont montré que dans les milieux semi-arides, les arbres favorisent la production de la strate herbacée. Ces auteurs expliquent que cela est lié à ce que le biotope sous couvert offre des conditions plus favorables à l'alimentation hydrique des plantes ; atténuant ainsi les effets de déficits pluviométriques. Les causes majeures de l'action bénéfique de l'arbre sur la strate herbacée sont généralement attribuées à l'amélioration des conditions hydriques et à l'accroissement de la fertilité des sols (Akpo, 1998). Belsky *et al.* (1993) et Le Houerou (1993), ont montré aussi que le couvert ligneux réduit le rayonnement solaire, la température de l'air et la vitesse du vent, ce qui a pour effet la réduction de l'évapotranspiration. Les travaux de Grouzis & Akpo (2003) ont montré que sur le plan édaphique, il apparaît que l'arbre augmente la fertilité des sols, tout au moins dans les horizons de surface, car, la matière organique est 2 à 5 fois plus élevée en surface (0 à 10 cm) et 1,5 fois pour l'horizon plus profond (50 cm) sous l'ombrage que dans la zone découverte. C'est ce qui explique la production herbacée largement supérieure sous-couvert à celle observée hors-couvert des arbres.

4.5. Azote minéral dans le sol

Les résultats obtenus à travers cette étude, montrent que sous les arbres, les teneurs en N minéral sont plus élevées que hors couvert. Les travaux de Guedira *et al.* (2008) et Abdou *et al.* (2013) ont montré l'effet positif de l'arbre avec une teneur en azote plus importante sous-houppier par rapport au témoin. Des résultats similaires ont été trouvés sous l'espèce *A. senegal* (Daldoum & Nimer, 2002, El Tahir *et al.*, 2004) et sous d'autres espèces d'arbres pérennes (Belsky *et al.*, 1993 ; Kumar *et al.*, 1998). La différence entre sous-couvert et hors-couvert des arbres peut être attribuée à la litière qui arrive à la surface du sol. Ces résultats sous-houppier résultent grâce à la litière produite mais aussi grâce aux branches et gousses tombées sur le sol et à l'action des microorganismes du sol sur la matière organique se trouvant sous les espèces végétales (Belsky *et al.*, 1993 ; Prinsley & Swift, 1994). En effet, la plus forte concentration de microorganismes

se trouvant sous le houppier aux horizons 0-10 cm chez certaines espèces expliquerait ces résultats. Une partie de l'azote minéral déterminé sous les houppiers des Légumineuses peut aussi résulter de la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par les rhizobiums associés aux racines de ces arbres. En effet, les espèces *A. senegal* et *A. tortilis* appartiennent à la famille des Légumineuses, donc capables de former une association symbiotique avec des bactéries de sol, les rhizobiums pour induire la formation des nodules où l'azote atmosphérique est fixé (Dommergues *et al.*, 1999). La teneur plus élevée en N minéral sous houppier dans certains cas pourrait être attribuée aussi à la décomposition de la litière herbacée qui pourrait être un autre facteur d'enrichissement du sol sous houppier (Buresh & Tian, 1998). Les travaux de Diallo *et al.* (2015a) ont montré que la biomasse herbacée était plus élevée sous houppier que hors houppier.

La concentration en nitrate n'est pas trop différente de celle en ammonium ; de ce fait il n'y pas de forme dominante de l'azote minéral. Cela montre que dans nos conditions d'étude la nitrification est aussi importante que la minéralisation. D'autres travaux ont relevé des taux différents selon le type de sol avec une concentration de nitrate plus élevée que celle de l'ammonium (Chen & Stark, 2000 ; Diallo *et al.* 2005) ou des concentrations en ammonium plus élevées (Laverman *et al.*, 2000, Uri *et al.*, 2003). Dans ce dernier cas, il s'agit de sols forestiers acides où l'ammonium est la seule forme d'azote disponible pour la nutrition végétale ; on parle également de blocage de la nitrification comme le démontre les travaux de Abbadie *et al.*, (1992) dans les savanes de Lamto.

4.6. La minéralisation nette de l'azote organique du sol

Le démarrage de la minéralisation nette en juin 2014 et février 2015 apparaît plus lent chez *B. aegyptiaca* et *B. senegalensis*, fait lié à ce que ces litières se dégraderaient moins vite (Wedin & Tilman, 1990). Les estimations que nous avons obtenues pour ces deux dates montrent une forte immobilisation de l'azote minéral dans les boîtes, ce qui peut s'expliquer par une période de forte dessiccation liée à la faible humidité en saison sèche. Le faible taux de minéralisation enregistré lors de l'incubation s'explique par le fait que l'arrière effet des litières est limité par la faible activité des bactéries dans les boîtes à cause de la faible humidité (Diallo *et al.*, 2006).

La minéralisation nette de l'azote résulte de l'intensité des deux processus de minéralisation brute et d'organisation brute. En présence de résidus végétaux dans le sol, la quantité d'azote contenue dans les résidus organiques (souvent traduit par leur rapport C/N) influence fortement ce bilan : la décomposition des résidus à faible C/N (riche en azote) induit une minéralisation

nette d'azote alors que la décomposition des résidus à C/N élevé (pauvre en azote) nécessite de prélever l'azote nécessaire au fonctionnement microbien, dans le compartiment minéral du sol, et provoque donc généralement une organisation nette d'azote (Trinsoutrot *et al.*, 2000). Nos résultats ont montré une corrélation entre la lignine et l'hémicellulose avec le net nitrate et le net N total. Selon Abiven & Recous (2007), l'évolution des résidus végétaux dans le sol est fonction de leur composition chimique (teneurs en C soluble, hémicellulose, cellulose et lignine). Des études anciennes de minéralisation de lignine marquée au ^{14}C ont, par exemple, montré qu'au bout de 2 ans de décomposition, le C issu de la lignine n'était pas incorporé dans la biomasse microbienne (Kassim *et al.*, 1981) et ces auteurs concluent que la lignine contribue majoritairement à la fraction stable de MO du sol.

4.7. La biomasse microbienne

Cette étude a aussi mis en évidence, une biomasse microbienne plus élevée sous-houppier que hors, ce qui est le résultat d'addition continue de la matière organique des arbres qui a un effet positif sur l'activité des organismes du sol. En effet, selon Smith & Paul (1990), la taille de la biomasse microbienne est proportionnelle à la biodisponibilité de la matière organique dans le sol. Ainsi, lors d'un apport de matière organique au niveau du sol, les microorganismes comme les bactéries (*Agrobacterium*, *Arthrobacterium*, *Bacillus*), les Actinobactéries (*Actinomyces*, *Nocardia*, *Streptomyces*) et les champignons (*Penicillium*, *Aspergillus*), entament une série de transformation des différents composés organiques. L'apport des litières stimule l'activité et le développement des microorganismes du sol par un effet direct avec l'apport de substrat carboné dans les systèmes sol-végétation (Vance & Chapin, 2001). Parmi ces substrats, les plus importants sont les composés solubles (Floret, 1999). Concernant la biomasse potentielle, l'effet climatique prime sur l'effet qualité de la litière, car, la variabilité est la même quel que soit le traitement. Un maximum est noté pendant la saison pluvieuse et un minimum en saison sèche. Ces résultats montrent que la mise en pot des sols entraîne une baisse du potentiel microbiologique en saison sèche. La forte dessiccation combinée à l'absence de matière organique donc de carbone organique qui constitue la principale source énergétique des microorganismes hétérotrophes expliquent la diminution du potentiel microbiologique du sol (Kabir *et al.*, 1994).

Dans les écosystèmes aride et semi-aride, en plus de la biomasse microbienne, les termites jouent un rôle important dans le processus de décomposition de la matière organique et agit ainsi sur la dynamique de la fertilité des sols (Grassé, 1986). Dans notre site d'étude, nous avons

eu à noter une forte abondance des termites, liée à une couverture herbacée quasi permanente du sol. L'importance de leur rôle dans la décomposition de la matière organique a fait qu'elles peuvent avoir un impact significatif sur les flux d'azote dans le sol. Selon Lepage (1980), le prélèvement des termites varie de 800 à 1500 kg/ha/an de litières et cette récolte peut être comparée à l'action des grands Mammifères herbivores sur un même site. Cette perte de matière due à l'activité des termites a un impact certain sur la fertilité des sols.

4.8. Diversité floristique des herbacées

La richesse floristique constitue un indicateur qui renseigne sur la présence ou l'absence d'espèces, et, par comparaison dans le temps, sur leur apparition ou leur disparition. Cette richesse est aussi conditionnée par une adaptation des différentes espèces à une amplitude plus ou moins grande des conditions de sol et de climat (Rey, 1997). La zone d'étude a révélé 28 espèces végétales herbacées qui se répartissent en 25 genres et 15 familles. Les familles les plus représentatives sont les *Poaceae*, suivi des *Fabaceae*, et enfin les *Convolvulaceae*. La forte proportion des *Poaceae* dans la zone d'étude peut s'expliquer par le fait que ces taxons possèdent une très grande possibilité de repousse et se retrouvent dans tous les relevés. Les *Poaceae* et ainsi que les *Fabaceae* offrent un potentiel fourrager très important ; ce qui favoriserait l'exploitation de la zone à des fins pastorales (Yoka *et al.*, 2013). Ces résultats corroborent ceux de Ndiaye *et al.* (2013) qui, dans leurs études ont trouvé que les espèces de la famille des *Poaceae* étaient les plus nombreuses, suivies de celles des *Fabaceae*, des *Rubiaceae* et des *Convolvulaceae*. La flore de la zone d'étude est relativement pauvre au regard des résultats obtenus par Ndiaye *et al.* (2013) dans la zone de Widou. Ces auteurs ont pu déterminer une richesse floristique élevée avec 52 espèces herbacées, réparties en 37 genres appartenant à 21 familles. Cette différence dans le nombre d'espèces pourrait s'expliquer par la surface explorée : nombre de relevés qui ont été réalisés et les conditions climatiques probablement différentes, car les relevés ont été effectués à des périodes différentes.

Nos résultats ont montré aussi que la présence de l'arbre exerce un effet favorable sur la végétation herbacée, par rapport au témoin qui est à découvert, car, il améliore la diversité spécifique. Cela pourrait s'expliquer par le fait que ce premier passage au témoin peut coïncider avec la phase végétative ou le début de la floraison des espèces herbacées, ce qui conduira à un non renouvellement de leur stock semencier, qui expliquerait l'absence des certaines espèces qui conduit à la pauvreté des espèces dans cette espace (Ngom *et al.*, 2013). Au contraire, sous les plantes ligneuses, la gêne causée par les branches permet aux herbacées de boucler leur

cycle de vie et de maintenir la pérennité de l'espèce ce qui expliquerait la diversité spécifique élevée sous couvert de certaines plantes ligneuses. La présence de houppier permet aussi de mettre à disposition une matière organique qui améliore la qualité du sol et la disponibilité des éléments minéraux rendant cette partie plus fertile donc plus favorable au développement des herbacées (Remigi *et al.*, 2008; Diallo *et al.*, 2006).

En ce qui concerne la différence de diversité spécifique entre les houppiers des ligneuses, la faible diversité des herbacées sous le genre *A. senegal* pourrait s'expliquer par le fait que les espèces herbacées sont plus exposées à la pression du bétail qui vient brouter les herbes sous couvert en profitant de l'ombrage des branches de cette plante (Akpo *et al.*, 2003). *A. senegal* étant situé dans la parcelle 2007, l'absence de clôture au niveau de la parcelle la rend donc très accessible au bétail. Au contraire, la mise en défens de la parcelle 2010, supprime le facteur animal qui pourrait induire des perturbations. Ainsi sur la carte factorielle, quatre groupements relevés/espèces ont été répertoriés sur l'axe F1 et l'axe F2. Les quatre groupements sont bien individualisés et chacun s'oppose aux autres par rapport à ces deux axes F1 et F2. Ces résultats concordent avec ceux observés par Akpo *et al.* (2003), qui ont montré qu'en zones semi-arides, le nombre d'espèces liées au couvert ligneux est nettement plus élevé que le nombre d'espèces inféodées aux milieux découverts. De même, dans la zone protégée, la végétation herbacée sous couvert est beaucoup plus diversifiée que celle du biotope découvert et que le seul facteur discriminant reste l'ombrage généré par le couvert de l'arbre (Akpo, 1993, Akpo *et al.*, 1999). D'autres résultats viennent appuyer nos observations (Belsky *et al.*, 1993). Ils indiquent l'effet favorable de l'arbre sur la végétation herbacée faiblement pâturée.

Certaines espèces comme *Aristida mutabilis* sont communes à tous les relevés alors que d'autres espèces sont spécifiques : *Achyranthes aspera* est spécifique à *S. birrea*, *Indigofera hirsuta* et *Cleome viscosa* à *B. senegalensis*, et *Cyperus esculentus* et *Eragrostis pilosa* sont spécifiques à *B. aegyptiaca*. Ces espèces ont montré des fréquences de présence équivalentes et sont les plus faibles. En revanche, d'autres espèces présentent des fréquences similaires, en raison de leurs affinités, soit pour les milieux sous couvert végétal, soit pour le site.

Conclusion et perspectives

Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude nous ont permis de caractériser les différentes Phénophases de cinq espèces végétales sahéliennes dans le Nord Ferlo du Sénégal. Les résultats ont montré une différence significative intraspécifique et interspécifique. La variabilité observée s'explique en grande partie par la variabilité et les fluctuations des conditions climatiques et environnementales. Cette étude a permis aussi de mettre en évidence l'influence que pourrait avoir l'arbre sur la fertilité des sols en particulier sur la disponibilité de l'azote minéral dans le sol et la biomasse microbienne. Les résultats ont montré que l'arbre favoriserait l'accumulation de la matière organique par le recyclage de ses organes externes (chute des feuilles, fruits et branches) et souterrains (racines), contribuant ainsi au maintien de la fertilité organique des sols. Ainsi, le sol se trouvant sous le houppier de l'arbre est mieux pourvu en azote que celui hors houppier. Il est à noter aussi, que sous-couvert, l'effet des espèces végétales domine sur l'effet des conditions climatiques. Par contre, l'incubation des pots *in situ* fait ressortir l'action des conditions climatiques notamment la pluviométrie et la température sur la biomasse microbienne et le N minéral, comme par exemple la faible pluviométrie enregistrée pour l'année 2014. Cette étude a permis de révéler une diversité aussi qualitative que quantitative. Ces résultats sont en accord avec d'autres études préalables déjà menées dans le même site et dans d'autres régions du pays: il y a un effet de l'arbre sur la diversité floristique.

Cette analyse a révélé que l'implantation de la GMV dans cette zone agroécologique aride permet une amélioration de la fertilité des sols grâce à la litière apportée par le houppier des arbres, une redynamisation de l'implantation des herbacées ainsi qu'une augmentation de leur production. Par ailleurs, la conservation et la valorisation de la biodiversité floristique des herbacées ont une incidence directe sur la survie des petits ruminants vivant dans ce milieu semi-aride.

Les perspectives qui se dégagent de cette étude, consistent à poursuivre les travaux pendant plusieurs années afin de confirmer certains des résultats obtenus. Il est prévu aussi de coupler la mesure des données météorologiques, grâce aux capteurs implantés dans la parcelle d'expérimentation, à celles de la phénologie et de la chute des litières. Il serait intéressant aussi de poursuivre les investigations en étudiant les effets de la symbiose mycorhizienne chez les *Acacia* étudiés sur la fertilité des sols en même temps que la minéralisation de l'azote.

D'autres perspectives de développement peuvent découler de cette étude avec l'élaboration de guide d'utilisation de la GMV en rapport avec les Institutions de développement comme l'ANCAR, le Ministère de l'Environnement et les Eaux et Forêts.

Références bibliographiques

- Abbadie L., Mariotti A., Menaut J. C., 1992. Independence of savanna grasses from soil organic matter for their nitrogen supply. *Ecology*, 73: 608-613.
- Abdou M. M., Miyaki Z. A., Kadri A., Ambouta J. M. K., Dan Lamso N., 2013. Effet de l'arbre *Acacia senegal* sur la fertilité des sols de gomméraires au Niger. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 7: 2328-2337.
- Abiven S., Recous S., 2007. Mineralisation of crop residues on the soil surface or incorporated in the soil under controlled conditions. *Biol. Fert. Soils*, 43: 849-852.
- Akpo L. E., 1993. Influence du couvert ligneux sur la structure et le fonctionnement de la strate herbacée en milieu sahélien. Les déterminants écologiques. Paris, Orstom, TDM, (93), 174 p.
- Akpo L. E., 1998. Effet de l'arbre sur la végétation herbacée dans quelques phytocénoses au Sénégal. Variation selon un gradient climatique. Thèse doct. d'État, UCAD Dakar, 133 p.
- Akpo L. E., Grouzis M., Bada F., Pontanier R., Floret C., 1999. Effet du couvert sur la structure de la végétation herbacée de jachères soudaniennes. *Sécheresse* ; 10 : 253-61.
- Akpo L. E., Banoin M., Grouzis M., 2003. Effet de l'arbre sur la production et la qualité fourragères de la végétation herbacée : bilan pastoral en milieu sahélien. *Revue Méd. Vét.*, 154 (10): 619-628.
- Alef K., Nannipieri P., Trazar-Cepada C., 1995. Phosphatase activity. In: Alef, K., Nannipieri, P. (Eds.), *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Paris, London, pp. 335-344.
- Amato M., Ladd J. N., 1988. Assay for microbial biomass based on ninhydrin-reactive nitrogen in extracts of fumigated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 20: 107-114.
- André D., Diatta A., Sène M., 2005. Eléments d'informations complémentaires à la marp effectuée au niveau de cinq forages de la zone sylvo-pastorale, 92 p.
- Arbonier M., 2002. Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest. 2^{ème} édition, 573 p.
- Arunachalam, A., K., Maithani, H. N., Pandey, H. N., Tripathi, R. S., 1998. Leaf litter decomposition and nutrient mineralization patterns in regrowing stands of a humid subtropical forest after tree cutting. *Forest Ecology and Management*, 109: 151- 161.

- Aubreville A., 1950. Les *Acacia*. In : Flore forestière soudano-guinéenne. Société d'Éditions Géographiques, pp. 250-288.
- Bárlocher F., 2005. Leaf Mass Loss Estimated by Litter Bag Technique. In: Graça MAS, Bárlocher F, Gessner MO, editors. Methods to Study Litter Decomposition Practical Guide. Dordrecht, The Netherlands: Springer; pp. 37-42.
- Barral H., 1982. Le Ferlo des forages : gestion ancienne et actuelle de l'espace pastoral. Dakar : O.R.S.T.O.M, 85 p.
- Barral H., Bénéfice E., Boudet G., Denis J. P., De Wispelaere G., Diaïte I., Diaw O. T., Dièye K., Doutre M. P., Meyer J.F., Noël J., Parent G., Piot J., Planchenault D., Santor C., Valentin C., Valenza J., Vassiliades G., 1983. Systèmes de production d'élevage au Sénégal dans la région du Ferlo. ACC GRIZA (LAT), Min. Rech. et Ind., GERDAT-ORSTOM, 172 p.
- Beare M. H., Reddy M. V., Tian G., Srivastava S. C., (1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics : The role of decomposer biota. *Applied Soil Ecology*, 6 : 87-108.
- Belsky A. J., Amundson R. G., Duxbury J. M., Riha S. J., Ali A. R., 1993. Comparative effects of isolate trees on their under canopy environments in highland low-rainfall savannas. *J Appl Ecol.*, 30 : 143-55.
- Berg B., Mc Clagherty C., 2008. Plant litter. Decomposition, humus formation, carbon sequestration. 2nd ed. Springer, Finland, 338 p.
- Berhaut J., 1967. Flore du Sénégal, deuxième édition plus complète avec les forêts humides de Casamance, 485 p.
- Berhaut J., 1975-1976. Flore illustrée du Sénégal. Ed. Gouvernement du Sénégal, MDR/DEF. Tome IV et Tome V.
- Bernhard-Reversat F., 1993. Dynamics of litter and organic matter at the soil-litter interface in fast-growing tree plantations on sandy ferrallitic soils (Congo). *Acta Ecologica*, 14 : 179-195.
- Bock E., Koops H. P., Harms H., Ahlers B., 1991. The biochemistry of nitrifying microorganisms. In: Variations in autotrophic life. Shively J. M. & Barton L. L. (ed.) Academy Press, London, pp. 171-200.
- Bocock, K.L., Gilbert O. J. W., 1957. The disappearance of leaf litter under different woodland conditions. *Plant and Soil*, (9): 179–185.

- Bonanomi, G., Incerti G., Antignani V., Capodilupo M., Mazzoleni S., 2010. Decomposition and nutrient dynamics in mixed litter of Mediterranean species. *Plant Soil*, 331: 481–496.
- Bottlikova H., Dajet P., Drdos J., Guillerm J. L., Romane F., Ruzickova H., 1976. Quelques résultats obtenus par l'analyse factorielle et les profils écologiques sur des observations phyto-écologiques recueillies dans la vallée de Liptov (Tchécoslovaquie). *Vegetatio*, 31 (2): 79-91.
- Boulton A. J., Boon P. I., 1991. A review of methodology used to measure leaf litter decomposition in lotic environments: time to turn over an old leaf? *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 42: 1-43.
- Bremner J. M., 1965. Nitrogen availability indexes. In : Black, C. A. (Eds.). *Methods of Soil Analysis, Part 2. American Society of Agronomy*, Madison, WI, pp. 1324-1345.
- Brenan J. P. M., 1983 – Manual on taxonomy of *Acacia* species. Present taxonomy of four species of *Acacia* (*A. albida*, *A. Senegal*, *A. nilotica*, *A. tortilis*). Rome, FAO, 47 p.
- Brochard F., Guerrere V., Oberlis E., 2013. Usages de l'arbre et de la biomasse en agroforesterie. Rapport Agrofor-Bio I, Guyane, p. 111.
- Buresh R. L., Tian G., 1999. Soil improvement by trees in sub-Saharan Africa. *Agroforest. Syst.*, 38: 51-76.
- Chambers J., 2001. *Pinus monophylla* establishment in expanding *Pinus juniperus* woodland: environmental conditions, facilitation and interacting factors. *J. Veg. Sci.*, 12 : 27-40.
- Chen J., Stark J. M., 2000. Plant species effects and carbon and nitrogen cycling in a sagebrush-crested wheatgrass soil. *Soil Biol. Biochem.*, 32: 47-57.
- Cibois P., 2006. Principe de l'analyse factorielle. 34p.
- Coundoul A. L., 2011. Rôle des marchés hebdomadaires sur les dynamiques de recomposition territoriale dans le Ferlo. Exemple du marché de bétail de Dahra. Mémoire de fin d'études, ATEGU ; ESEA, 60 p.
- Cornet A., Poupon H., 1978 - Description des facteurs du milieu et de la végétation dans cinq parcelles situées le long d'un gradient climatique en zone sahélienne du Sénégal. *Bull. IFAN*, 39 (2): 241-302.
- CSE, 2002. Bilan climatique de l'Observatoire ROSELT du Ferlo (Sénégal). ROSELT/OSS, CSE, Dakar, Février, 38 p.
- Coughenour M. B., Delting J. K., Bamberg I. E., Mugambi M. M., 1990. Production and nitrogen responses of the African dwarf shrub *Indigofera spinosa* to defoliation and water limitation. *Oecologia*, 83 : 546-552.

- D'Annunzio R., 2008. Dynamics of organic matter under eucalyptus clonal plantations in Congo. Life Sciences. Agro Paris Tech, 222 p.
- Daldoum M. A., Nimer A. M., 2002. Effects of *Acacia senegal* (L., Wild) on sandy soils: a case study of El Demokeya Forest. University of Khartoum. *J. Agric. Sci.*, 10: 198-210.
- Depommier D., 1998. Etude phénologique de *Faidherbia albida* : effet de l'émondage, du site et de la dimension de l'arbre sur les phénophases de l'espèce au Burkina Faso. In : Campa Claudine (ed.), Grignon C. (ed.), Gueye M. (ed.), Hamon Serge (ed.). L'acacia au Sénégal. Paris : ORSTOM, Colloques et Séminaires, pp. 159-179.
- Dia A, Niang MA, 2012. Initiative africaine de la Grande Muraille Verte : Contexte, vision et opérationnalisation, 11 p.
- Dia A., Duponnois R., 2012. La grande muraille verte : Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux. Nouvelle édition. Montpellier IRD Editions, 705 p.
- Diallo A., Codjo E, A., Ndiaye O., Guissé A. 2013. Ecological Structure and Prediction Equations for Estimating Tree Age, and Dendometric Parameters of *Acacia senegal* in the Senegalese Semi-Arid Zone—Ferlo, *American Journal of Plant Sciences*, 4: 1046-1053.
- Diallo M. D., Duponnois R, Guisse A, Sall S, Chotte J. L., Thioulouse J., 2006. Biological effect of native and exotic plant residues on plant growth, microbial biomass and N availability under controlled conditions. *European Journal of Soil Biology*, 42 (4): 238-246.
- Diallo M. D., Guissé A., Badiane-Niane A., Sall S. N., Chotte J. L., 2005. In situ effect of some tropical litters on N mineralization. *Arid Land Res. Manag.*, 19: 173-181.
- Diallo M. D., Duponnois R., Guissé, A., Sall, S.N., Chotte, J.L., Thioulouse J., 2006. Biological effects of native and exotic plant residues on plant growth, microbial biomass and N availability under controlled conditions. *Europ. J. Soil Biol.*, 42: 238-246.
- Diallo M. D., Guissé A., Sall S. N., Dick R. P., Assigbetsé K. B., Dieng A. L., Chotte J. L., 2015c. Influence of tropical leaf litters on N mineralization and community structure of ammonia-oxidizing bacteria. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 19 : 145-155.
- Diallo M. D., Mahamat-Saleh M., Ndiaye O., Diop A., Guisse A., 2015b. Influence de la décomposition de la nécro-masse des espèces végétales tropicales sur le pH et la structure génétique des communautés bactériennes d'un sol ferrugineux tropical au Sénégal. *Journal of Applied Biosciences*, (91): 8547–8558.

- Diallo M. D., Ndiaye O., Diallo A., Mahamat-Saleh M., Bassène C., Wood S., Diop A., Guisse A., 2015a. Influences de la litière foliaire de cinq espèces végétales tropicales sur la diversité floristique des herbacées dans la zone du Ferlo (Senegal). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(2) : 803 – 814.
- Diédhiou I., 1994. Importance des légumineuses dans les systèmes écologiques arides et semi-arides du Sénégal. DEA, UCAD-ISE, Dakar, 69 p.
- Diop A.T., Diaw O.T., Dieme I., Toure I., Sy O., Dieme G., 2004. Mares de la zone sylvo-pastorale : tendances évolutives et rôle dans les stratégies de production des populations pastorales. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, pp. 77-85
- Diouf M., Zaafour M. S., 2003. *Acacia raddiana*, un arbre des zones arides à usages multiples. In Grouzis M., Le Floch E., éd. : *Un arbre au désert. Acacia raddiana* Paris, IRD Éditions, pp. 21-58.
- Do F., Rocheteau A., Diagne A. L., Grouzis M., 1998 - Flux de sève et consommation en eau de *Acacia tortilis* dans le Nord-Ferlo. In Campa et al. éd.: *L'Acacia au Sénégal*, collection « colloques et séminaires », ORSTOM Ed 64-80.
- Dunham K. M., 1991. Phenology of *Acacia albida* trees in Zambezi riverine woodlands. *African J. Ecol.*, 29 (1): 18-129.
- Dommergues Y. R., Duchoux E., Diem H. G., 1999. Les Arbres Fixateurs d'Azote : Caractéristiques Fondamentales et Rôle dans l'Aménagement des Ecosystèmes Méditerranéens et Tropicaux. CIRAD, Edition Espace, FAO, IRD Montpellier.
- Duponnois R., Founoune H., Masse D., Pontanier R., 2005. Inoculation of *Acacia holosericea* with ectomycorrhizal fungi in a semi-arid site in Senegal: growth response and influences on the mycorrhizal soil infectivity after 2 years plantation. *Forest Ecology and Management*, 207: 351-362.
- Dupuy N. C., Detrez C., Neyra M., Lajudie P., Dreufus B. L., 1991. Les Acacias fixatrices d'azote du Sahel. *La Recherche*, 22 : 803-804.
- El Ayadi F., 2013. Diversité des Ressources Génétiques des Acacia sahariens (*Acacia tortilis subsp raddiana*) du Maroc : Approche Cytogénétique, Morpho-métrique et Moléculaire. Thèse de Doctorat des Ressources Phytogénétiques en Science de la Vie et Ressources Naturelles. Université Ibn Zohr, 204 p.
- El Tahir B. A., Madibo G. M., El Wakeel A. S., 2004. Influence of *Acacia senegal*, *Acacia seyal* and *Acacia tortilis* on some properties of sandy soil in North Kordofan State, Sudan. *Univ. Khart. J. Agri. Sci.*, 12: 127-141.

- Eyog Matig O., Ndoye O., Kengue J., Awono A., 2006. Les fruitiers forestiers comestibles du Cameroun. International Plant Genetic Resources Institute, 204 p.
- FAO, 2008. Quelques espèces ligneuses et herbacées utilisées pour la fixation des dunes, 13 p.
- FAO, 2009. L'État de l'insécurité alimentaire dans le monde - crises économiques répercussions et enseignements. Rome.
- Faye B., 2006. Les pasteurs sont des éleveurs "contemplatifs" ! Ourade G. (dir.). L'Afrique des idées reçues, Paris, Belin, pp. 281-287.
- Feller, C., 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols, application aux sols tropicaux, à textures grossières, très pauvres en humus. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 17 (4) : 339-346.
- Fleur E. S., 2009. Les habitants du Sahel face à la déforestation. Activités quotidiennes et lutte des femmes, INRA, France, 6 p.
- Floret C., 1999. Jachères et systèmes agraires. Atelier, Niamey, 30 sept.-3 oct., Faculté d'Agronomie-ORSTOM.
- Fioretto A., Papa S., Pellegrino A., Fuggi, A., 2007. Decomposition dynamics of *Myrtus communis* and *Quercus ilex* leaf litter: Mass loss, microbial activity and quality change. *Applied Soil Ecology*, (36), 32-40.
- Freitas A. D. S., Silva T. O., Menezes R. S. C., Sampaio E. V. S. B., Araujo E. R., Fraga V. S., 2011. Nodulation and nitrogen fixation of caatinga forage species grown in soils of the semiarid area of Paraíba. *R. Bras. Zootec.*, 40 : 1856–1861.
- Garrity D. P., Akinnifesi F. K., Ajayi O. C., Weldesemayat S. G., Mowo J. G., Kalinganire A., Larwanou M., Bayala J., 2010. Evergreen Agriculture: a robust approach to sustainable food security in Africa. *Food Sec.*, 2 : 197-214.
- Gessner M. O., Chauvet E., 2002. A case for using litter breakdown to assess functional stream integrity. *Ecological Applications*, 12 : 498–510.
- Gnahoua G. M., Oliver R., Nguessan K. A., Balle P., 2013. Production et retombées minérales des litières chez quatre espèces de légumineuses arborées, utilisées en amélioration de jachères, en zone forestière de Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, (72), 5800– 5809.
- Goma-Tchimbakala J., Ndongou-Hockemba M., Kokolo A., Mboussou-Kimbangou A. N. S., 2005. Variations des apports de litière et d'éléments minéraux dans les plantations de limba (*Terminalia superba*) au Congo. *Tropicultura*, (23), 53-59.
- Goudiaby V. C. A., 2003. Impact d'un déficit hydrique sur la feuillaison d'*Acacia tortilis* (forsk.) hayne subsp. *raddiana* (savi) brenan var. *raddiana* dans le nord-Ferlo au Sénégal. Thèse

- de Doctorat de troisième cycle en Biologie Végétale. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 91p.
- Grande Muraille Verte, 2012. Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux, 691 p.
- Grassé, P., 1986- Termitologia. Tome III : Comportement .. écologie, évolution, systématique. ed, Masson, 715 p.
- Grayston S. J., Prescott C. E., 2005. Microbial communities in forest floors under four tree species in coastal British Columbia. *Soil Biol Biochem*, 37 : 1157-1167.
- Grouzis M., Akpo L. E., 2003. Influence d'Acacia raddiana sur la structure et le fonctionnement de la strate herbacée dans le Ferlo sénégalais *In : Un arbre au désert : Acacia raddiana*. Montpellier, IRD Éditions.
- Grouzis M., Sicot M., 1980. Une méthode d'étude phénologique de populations d'espèces ligneuses sahéliennes : influence de quelques facteurs écologiques. *In Le Houérou H. N., éd. : Les fourrages ligneux en Afrique : état actuel des connaissances*, Addis-Abeba, CIPEA, pp. 231-237.
- Guedira A., Satrani B., Douira A., 2008. Effet de la densité de *Cytisus grandiflorus* (Brot.) DC. sur la fertilité du sol en azote et son influence sur la croissance d'une plantation de cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti). *Acta Bot. Gal.: Bot. Let.*, 155 : 375-387.
- Guissé A., Boëtsch G., Ducourneau A., Goffner D., Gueye L., 2013. L'Observatoire hommes – milieux international Tessékéré (OHMi) : un outil de recherche pour étudier la complexité des écosystèmes arides du Sahel. *Crit. Rev. Biol.*, 336: 273-277.
- Guo L. B., Sims R. E. H., 1999. Litter decomposition and nutrient release via litter decomposition in New Zealand eucalypt short rotation forests. *Agriculture Ecosystems and Environment*, (75): 133- 140.
- Guo, L. B., Sims, R. E. H., 2001. Eucalypt litter decomposition and nutrient release under a short rotation forest regime and effluent irrigation treatments in New Zealand: II. internal effects. *Soil Biology and Biochemistry*, 34 : 913-922.
- Habu R., Mom I. M., Yacoubou B., Diouf A., Boubacar K. M., Ali M., Saidou I. S., Mahamane S., Lykke A. M., 2014. Structure de la population de *Boscia senegalensis* (Pers) Lam. Ex Poir suivant la toposéquence dans la commune de Simiri (Niger). *Journal of Animal and Plant Sciences*, 23(3) : 3657-3669.

- Head, I. M., Hiorns, W. D., Embley, T. M., McCarthy, A. J., Saunders, J. R. (1993). The phylogeny of autotrophic ammonia-oxidizing bacteria as determined by analysis of 16S ribosomal RNA gene sequences. *J. Gen. Microbiol.*, 139: 1147–1153.
- Hamilton J. G., Zangerl A. R., DeLucia E. H., Berenbaum M. R., 2001. The carbon–nutrient balance hypothesis: its rise and fall. *Ecol. Lett.*, 4: 86-95.
- Hart S. C., Stark J., Davidson E. A., Firestone M., 1994. Nitrogen mineralization, immobilization and nitrification, in: Weaver, R.W., Angle, S., Bottomley, P. (Eds), *Methods of soil analysis, Part 2. Microbiological and biochemical properties*. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 985-1018.
- Heal O. W., Anderson J. M., Swift M. J., 1997. Plant litter quality and decomposition: An historical overview. In: G. Cadisch and K.E. Giller, editors, *Driven by nature: Plant litter quality and decomposition*. CAB International, Wallingford, 3–30.
- IBGE, 2014. Evaluation des techniques alternatives pour une gestion des eaux pluviales sur l'espace collectif. Fiche informative – « arbres de pluie » 10 p.
- IRD, 2008. Un mécanisme génétique universel découvert chez les plantes fixatrices d'azote. Actualité scientifique. Fiche n°288, pp. 2-3.
- Jabiol, J., Chauvet. E., 2012. Fungi are involved in the effects of litter mixtures on consumption by shredders. *Freshwater Biology*, 57:1667–1677.
- Janicot S., Fontaine B., 1993. L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. In : *La météorologie*, 8 série n°1, pp. 28-58.
- Jaouadi W., Hamrouni L., Khouja M. L., 2012. Phénologie d'*Acacia tortilis* subsp. *raddiana* dans le parc national de Bou Hedma en Tunisie, effet du site sur les phénophases de l'espèce. *Bois Et Forêts Des Tropiques*, 312 (2): 21-29.
- Jirka A. M., Carter M. J., 1975. Micro semi-automated analysis of surface and wastewaters for chemical oxygen demand. *Anal. Chem.*, 47, 1397 p.
- Jones R. W., Richards B. N., 1977. Effect of reforestation on turnover of 15N-labelled nitrate and ammonium in relation to changes in soil microflora. *Soil Biology & Biochemistry*, 9: 383-392.
- Kabir M. D. M., Chotte J. L., Rahma M., Bally R., Jocteur Monrozier L., 1994. Distribution of soil fraction and location of soil bacteria in a vertisol under cultivation and perennial grass. *Plant Soil*, 163: 243-255.
- Kassim G., Martin J. P., Haider K., 1981. Incorporation of a Wide Variety of Organic Substrate Carbons into Soil Biomass as Estimated by the Fumigation Procedure. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 1106-1112.

- Keeney D. R., Nelson D. W., 1982. Nitrogen-inorganic forms. *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. ASA-SSSA. Madison, WI, USA, 2: 643-700.
- Kerharo J, Adam J. G., 1974. La pharmacopée sénégalaise traditionnelle. Plante médicinale et toxique. Paris. Ed. Vigot Frères. 962 p.
- Kominoski J. S., Pringle C.M., 2009. Resource-consumer diversity: testing effects of leaf litter species diversity on stream macroinvertebrate communities. *Freshwater Biology*, 54: 1461–1473.
- Koops H. P., Purkhold U., Pommerening-Röser A., Timmermann G., Wagner M., 2003. The lithoautotrophic ammonia-oxidising bacteria, in: Dworkin, D., Falkow, S., Rosenberg, E., Schleifer, K.H., Stackebrandt, E. (Eds). *The Prokaryotes: An Evolving Electronic Resource for the Microbiological Community*, 3rd edition, release 3.13. NY, USA: Springer-Verlag.
- Kowalchuk G. A., Stienstra A. W., Helig G. H. J., Stephen J. R., Woldendorp J. W., 2000. Molecular analysis of ammonia oxidising bacteria in soil of successional grasslands of the Drentsche A (The Netherlands). *FEMS Microbiol. Ecol.*, 31: 207-215.
- Kumar R., Kumar A., Dhillon R. S., 1998. Morphological and physico-chemical characteristics of soils under different plantation in arid ecosystem. *Indian J. Forest.*, 21: 248-252.
- Lamotte M., 1962. Initiation aux méthodes statistique en Biologie. Lie Masson, Paris, 144 p.
- Lata J. C., 1999. Interactions entre processus microbiens, cycle des nutriments et fonctionnement du couvert herbacé: cas de la nitrification dans les sols d'une savane humide de Côte d'Ivoire sous couvert à *Hyparrhenia diplandra*. These de Doctorat de l'Universite Pierre et Marie Curie - Paris VI , 218 p.
- Laverman A. M., Zoomer R., Van Verseveld H. W., Verhoef H. A., 2000. Temporal and spatial variation in nitrogen transformations in a coniferous forest soil. *Soil Biol. Biochem.*, 32 : 1661-1670.
- Lecerf A., Dobson M., Dang C. K., Chauvet E., 2005. Riparian plant species loss alters trophic dynamics in detritus-based stream ecosystems. *Oecologia*, 146 : 432–442.
- Le Houerou H. N., 1989. The grazing land ecosystems of the African Sahel. Berlin, Springer-Verlag, *Ecological Studies*, (75): 282 p.
- Le Houerou H. N., 1993. Environmental aspects of fodder trees and shrubs plantation in the Mediterranean basin. In Papanastasis V ed.: Fodder trees and shrubs in the Mediterranean Production Systems: objectives and expected results of the EC research

- contract, Brussels, Commission of the European Communities, EUR 14459, 205: 11-34.
- LEAD/ PPZS, 2005. La circulation de l'information en milieu pastoral : Ferlo (Sénégal) et Kanem (Tchad). Document d'étude. LEAD/PPZS, 36 p.
- Lebrun J. P., Stork A. L., 1997. "Enumération des plantes à fleurs d'Afrique tropicale. Conservatoire et Jardin botaniques de Genève," Vol. I, II, III, IV, pp. 249, 257, 341, 712.
- Lemée G., 1967. Investigation sur la minéralisation de l'azote et son évolution annuelle dans les humus forestiers *in situ*. *Oecol ; Plant*, 2: 285-324.
- Lepage M., 1981. — L'impact des populations récoltantes de *Macrotermes aff. subhyalinus* (Isoptera: Macrotermitinæ) dans un écosystème semi-aride (Kajiado-Kenya). II: Food offtake, comparison with large herbivores. *Insectes Sociaux*, 28(4) : 309-319.
- Lepron J. E., 1971.- Nouvelles observations sur les formations dunaires sableuses fixées du Ferlo nord occidental (Sénégal). *An Sénégal Et. Quatern. Ouest Afr., Bull Liaison, Sénégal*, 31 : 69-78.
- LeRoy C. J., Marks J. C., 2006. Litter quality, stream condition, and litter diversity influence decomposition rates and macroinvertebrate communities. *Freshwater Biology*, 51: 605–617.
- Lopez-Pintor, A., Espigares, T., Rey-Benayas, J. M., Gomez-Sal A., 2000. Effect of simulated parent-created microenvironment conditions on germination of *Retama sphaerocarpa* (L.) Boiss. Seeds. *J. Medit. Ecol.*, 1: 219-226.
- Lugo A. E., Wang D., Bormann F. H., 1990. A comparative analysis of biomass production in five tropical tree species. *Forest Ecology and Management*, 31 : 153-166.
- MacDonald R. M., 1986. Nitrification in soil: an introductory history. In: Nitrification, pp. 1–16. Edited by J. I. Prosser. Oxford: IRL Press.
- Mahamat-Saleh M., Ndiaye O., Diallo M. D., Goy S., Niang K., Diallo A., Guisse A., 2015. Caractérisation des peuplements ligneux sur le tracé de la Grande Muraille Verte au Tchad. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(5): 2617-2627.
- Marie-Alain M. B., Alain L., Amougou A., Elvire H., 2005. Phénologie florale dans une jeune forêt secondaire hygrophile du Cameroun. *Acta Botanica Gallica*, 152 : 25-43.
- Marigo G., 1973. Sur une méthode de fractionnement et d'estimation des composés phénoliques chez les végétaux. *Analysis*, 2: 106-110.

- Masse D., Cadet P., Chotte J.-L., Diatta M., Floret C., N'Diaye-Faye N., Pate E., Pontanier R., Thioulouse J., Villenave C., 1998. Jachères naturelles et restauration des propriétés des sols en zone semi-aride. Cas du Sénégal. *Agriculture et développement*, 18 : 31-38.
- Melillo J.M., Aber J. D., Muratore, J. F., 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecol.*, 63: 621-626.
- Michel P., 1969. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Thèse doctorat es sc., Strasbourg, 1167 p.
- Michel P., 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : étude géomorphologique. Thèse. Mémoire Orstom, 3 tomes, 753 p.
- Morellato P. L., 1992. Nutrient cycling in two South-east Brazilian forest. I. Litterfall and litter standing crop. *Journal of Tropical Ecology*, 8: 205-215.
- Ndiaye F. D., 1996. Contribution à l'étude chimique et biochimique des graines de *Balanites aegyptiaca* (L. DEL. (Simarubaceae) et de *Parinari macrophylla* Sabine (Rosaceae). Thèse de Docteur d'Ingénieur en Chimie et Biochimie des corps gras. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 234p.
- Ndiaye O., Aly D., Stephen A. W., Guissé A., 2014. Structural Diversity of Woody Species in the Senegalese Semi-Arid Zone—Ferlo. *American Journal of Plant Sciences*, 5: 416-426.
- Ndiaye O., Diallo A., Sagna M. B., Guisse A., 2013. Diversité floristique des peuplements ligneux du Ferlo, Sénégal. *Vertigo, la revue électronique en sciences de l'environnement*, 13 : 3-12.
- Ndoye M., Diallo I., Gassama-Dia Y. K., 2004. Reproductive biology in *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., a semi-arid forest tree. *Afr. J. Biotechnol.*, 3(1), 40-46.
- Ngaryo F.T., Goudiaby V.C., Akpo L.E., 2010. Caractéristiques d'une gomméraie d'*Acacia senegal* (L.) Wild. dans la région du Chari Baguirmi au Tchad. *Journal des Sciences*, 10(2) : 13 – 23 p.
- Ngom D., Fall T., Sarr O., Diatta S., Akpo L. E. 2013. Caractéristiques écologiques du peuplement ligneux de la réserve de biosphère du Ferlo, Sénégal. *Journal of Applied Biosciences*, 65 :5008 – 5023.
- Niang K., Ndiaye O., Diallo A., Guissé A., 2014. Flore et structure de la végétation ligneuse le long de la Grande Muraille Verte au Ferlo, nord Sénégal. *Journal of Applied Biosciences*, 79: 6938 – 6946.
- Piot J., Nebout J. P., Nanot R., Toutain R., 1980. Utilisation des ligneux sahéliens par les herbivores domestiques : étude quantitative dans la zone sud de la Mare d'Oursi (Haute-

- Volta). Paris, France, Centre technique forestier tropical, Institut d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux, 304 p.
- Poda D., Zida M., Zoubga S., Béréoudougou H., Lankoandé A., Zoungrana J. E., Tiveau D., 2009. Manuel pratique de production durable des gommés au Burkina Faso. CIFOR, 58 p.
- Poupon H., 1979. Étude de la phénologie de la strate ligneuse à Fété-Olé (Sénégal septentrional) de 1971 à 1977. *Bull. IFAN*, sér. A, 41(I) :44-85.
- Prinsley R. T., Swift M. J., 1994. Amelioration of Soil by Trees: a Review of Current Concepts and Practices. Commonwealth Science Council, London, pp. 104-120.
- Prosensols, 2010. La matière organique du sol 52p.
- Prosser J. I., 1986. *Nitification*. Oxford, UK: IRL Press.
- Rey B., 1997. Prise en compte de la dynamique forestière dans le cadre de la gestion multifonctionnelle des espaces boisés. In Conservation des écosystèmes forestiers : pp. 97-104.
- Recous S., Robin D., Darwis, D., Mary B., 1995. Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition. *Soil Biol. Biochem.*, 27: 1529-1538.
- Remigi P; Faye A; Kane A; Deruaz A; Thioulouse J; Cissoko M; Prin Y; Galiana A; Dreyfus B, Duponnois R., 2008. The exotic legume tree species *Acacia holosericea* alters microbial soil functionalities and the structure of the arbuscular mycorrhizal community. *Applied And Environmental Microbiology*, (74): 1485-1493.
- Robertson G.P., 1989. Nitrification and denitrification in humid tropical ecosystems: potential controls on nitrogen retention. In Mineral nutrients in tropical forest and savanna ecosystems Ed. Proctor, J., Blackwell Scientific. *British Ecological Society Special Publication*, 9: 55-69.
- Rongead, 2014. *Balanites aegyptiaca* 16 p.
- Samb N., 2010. Influence d'*Acacia senegal* (L.) willd sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies (D.E.A) en Biologie Végétale Option : Écologie. Université Cheikh Anta Diop de Dakar. 69 p.
- Sall P. N., 1997. Le gommier et la gomme arabique. Notes techniques du projet RCS- Sahel 1 507/RAF/43.
- Sarr O., Diatta A. S., Gueye M., Ndiaye P. M., Guisse A, Akpo L. E., 2013, Importance des ligneux fourragers dans un système agropastoral au Sénégal (Afrique de l'ouest). *Revue Méd. Vét. Toulouse*, 164 : 1, 2-8.

- Sarr M. S., 2009. Dynamique et production de gomme arabique de peuplements naturels et d'essai provenances d'Acacia senegal. Thèse 3 cycle en Biologie Végétale, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 37 p.
- Schulz E., Amadou A., 1992. Leben in der Sudlichen Sahara. Die traditionelle Nutzung der Vegetation im Nord-Niger. Abschlussbericht zum Forschungsv. 1/52 749, 188 p.
- Schwartz D., 1993. Les retombées de litière en tant que source de carbone et de l'azote du sol. Quantification et périodicité des apports en relation avec les caractéristiques climatiques et édaphiques dans deux parcelles de forêt dense à Dimonika (Mayombe, Congo). Echanges Forêt-Atmosphère en milieu tropical humide. PNUD/UNESCO, pp. 141-157.
- SIFOR, 2009. Répertoire des espèces forestières ligneuses des régions de Mopti, Tombouctou et Gao. Rapport final, 181 p.
- Smith J. L., Paul E. A., 1990. The significance of microbial biomass estimations, in: Bollag, J.M., Stotzky, G. (Eds.). *Soil biochemistry*, 6: 357-396.
- Soloviev P., Zerbo G. C., Lompo D., Yoda L. B., Jacques D., Diallo A., 2009. *Acacia senegal* au Burkina Faso: état de la ressource et potentiel productif. *Bois et Forêts des Tropiques*, 300(2): 15-25.
- Singh G., Singh B., Kuppusamy V., Bala N., 2002. Variations in foliage and soil nutrient composition in *Acacia tortilis* plantation of different ages in north-western Rajasthan. *Indian Forester*, 128: 514-521.
- Sørensen T., 1948. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content. *K. Danske Vidensk. Selsk*, 5: 1-34.
- Stancioff A., Staljanssens M., Tappan G., 1986. Cartographie et télédétection des ressources de la République du Sénégal : étude de la géologie, de l'hydrologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisation. Brookings, SD, USA, Remote Sensing Institute, South Dakota State University, p. 653.
- Sundarapandian S. M., Swamy P. S., 1999. Litter production and leaf litter decomposition of selected tree species in tropical forests at Kodoyar in the Western Ghats, India. *Forest Ecology and Management*, 123 : 231-244.
- Sy O., 2009. Rôle de la mare dans la gestion des systèmes pastoraux sahéliens du Ferlo (Sénégal) », *Cybergeo : European Journal of Geography*, Environnement, Nature, Paysage, 440 p.
- Tappan G., 1985. Végétation et utilisation des sols en cartographie et télédétection des ressources de la République du Sénégal. Dakar : Direction de l'Aménagement du Territoire. Agency for International Development, pp. 477-629.

- Tian G., Badejo M. A., Okoh A. I., Ishida F., Kolawole G. O., Hayashi Y., Salako F. K., 2007. Effects of residue quality and climate on plant residue decomposition and nutrient release along the transect from humid forest to Sahel of West Africa. *Biogeochem.*, 86: 217-229.
- Tittonell P., Muriuki A., Klapwijk C. J., Shepherd K. D., Coe, 2013. Soil Heterogeneity and Soil Fertility Gradients in Smallholder Farms of the East African Highlands. *Soil Science Society of America Journal*, pp. 525 – 538.
- Torreta N. K., Takeda H., 1999. Carbon and nitrogen dynamics of decomposing leaf litter in tropical hill evergreen forest. *Eur. J. Biol.*, (35) : 57- 63.
- Trinsoutrot I., Recous S., Bentz B., Lineres M., Cheneby D. And Nicolardot B., 2000. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64 : 918–926.
- Trochain J., 1980. Ecologie végétale de la zone intertropicale non désertique. Univ. Paul Sabatier, Toulouse, 468 p.
- Uri V., Lohmus K., Tullus H., 2003. Annual net nitrogen mineralization in a grey alder (*Alnus incana* (L.) moench) plantation on abandoned agricultural land. *Forest Ecol. Manag.*, 184: 167-176.
- Valenza J., Diallo A. K., 1972. Etude des pâturages naturels au Nord Sénégal. IEMVT : Paris, LNERV : Dakar. Etude Agrostologique, no 34 ; 311 p.
- Van Soest P. J., 1963. Use of detergent in analysis of fibrous feeds : a rapid method for the determination of fibre and lignin. *J. Assist. Off. Agric. Chem.*, 46: 829-835.
- Vance E. D., Chapin III F. S., 2001. Substrate limitations to microbial activity in taiga forest floors. *Soil Biol. Biochem.*, 33: 173-188.
- Vittel, 2013. Les services éco-systémiques des arbres pour l'eau. Retour d'expériences pur projet / vittel en milieu tropical et tempéré, 55p.
- Vitousek P. M., 1981. Clear-cutting and the nitrogen cycle. In *Terrestrial Nitrogen Cycles* 631-642 (eds. F. E. Clark & T. Rosswall). *Ecol. Bull.*, Vol. 33, Stockholm.
- Von Maydell H. J., 1983. Arbres et arbustes du Sahel. Leurs caractéristiques et leurs utilisations. Eschborn, Schriftenreihe der GTZ No. 147, 531 p.
- Walker M. D., Ingersoll R. C., Webber P. J., 1995 – Effects of interannual climate variation on phenology and growth of two alpine forbs. *Ecology*, 76 (4) : 1067-1083.
- Watson S. W., Bock E., Harms H., Koops H. P., Hooper A. B., 1989. Nitrifying bacteria. Pages 1808-1834, *In: Manual of Systematic Bacteriology*, Vol. 3. J. T. Stanley (Editors), Bergey's. Williams and Wilkins, Baltimore.

- Wendin D. A., Tilman D., 1990. Species effects on nitrogen cycling: a test with perennial grasses. *Oecologia*, 84: 433-441.
- Weltzin J. F., Coughenou M. B., 1990. Savanna tree influence on understory vegetation and soil nutrients in northwestern Kenya. *Journal of Vegetation Science*, 1: 325-334.
- Yadvav R. K., Yadav A.S., 2008. Phenology of selected woody species in a tropical dry deciduous forest in Rajasthan, India. *Tropical Ecology*, 49(1): 25-3.
- Yoka J., Loumeto J. J., Djego J., Voudibio J., Epron D., 2013. Évaluation de la diversité floristique en herbacées des savanes de la cuvette congolaise (République du Congo). *Afrique Science*, 09(2) : 110 – 123.
- Zakra A. N., 1997. Contribution à l'étude de la restauration et du maintien de la fertilité des sables quaternaires du littoral ivoirien : Cas de l'utilisation d'arbres fixateurs biologiques d'azote comme plantes associatives avec les cocotiers. Thèse de Docteur-Ingénieur. Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 152 p.

SITOGRAPHIE

<http://www.agriculture.gouv.sn/>

<http://www.ansd.sn/>

<http://www.ppzs-esp.ucad.sn/index.php?la=eng>

<http://www.environnement.gouv.sn/>

<http://www.doc-developpement-durable.org>

Annexes

Annexe 1. Article IJBCS, Diallo et al., 2015



Available online at <http://ajol.info/index.php/ijbcs>

Int. J. Biol. Chem. Sci. 9(2): 803-814, April 2015

ISSN 1997-342X (Online), ISSN 1991-8631 (Print)

International Journal
of Biological and
Chemical Sciences

Original Paper

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Influence de la litière foliaire de cinq espèces végétales tropicales sur la diversité floristique des herbacées dans la zone du Ferlo (Senegal)

Mariama Dalanda DIALLO^{1*}, Ousmane NDIAYE², Aly DIALLO²,
Minda Mahamat SALEH², César BASSENE¹, Stephen A. WOOD^{3,4},
Aliou DIOP⁵ et Aliou GUISSÉ²

¹Section Productions Végétales et Agronomie, UFR des Sciences Agronomiques, de l'Aquaculture et des Technologies Alimentaires, Université Gaston-Berger, Saint-Louis, Sénégal.

²Département de Biologie Végétale, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.

³Department of Ecology, Evolution & Environmental Biology, Columbia University, New York, USA.

⁴Agriculture and Food Security Center, The Earth Institute, Columbia University, New York, USA.

⁵Section Mathématiques Appliquées, UFR des Sciences Appliquées et Technologie, Université Gaston-Berger, Saint-Louis, Sénégal.

*Corresponding author; E-mail: mariama-dalanda.diallo@ugb.edu.sn; Tel: +221 77 642 0974

RESUME

L'objectif de cette étude a été d'évaluer l'effet de la présence de cinq plantes ligneuses: *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Acacia tortilis* subsp. *raddiana* (Savi) Brenan, *Acacia senegal* (L.) Willd., *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir. et *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst. sur la diversité spécifique de la végétation herbacée dans le Ferlo, au Nord-Sénégal. Il a été procédé à un inventaire des espèces herbacées sous couvert et hors couvert des plantes ligneuses. Ensuite, une analyse floristique qualitative (familles, genres et espèces) a été réalisée à partir de la liste floristique des différents inventaires. Cette analyse a été couplée à une approche quantitative en utilisant le coefficient de similitude de Sorensen qui a servi à définir l'indice de diversité beta. Les résultats de l'inventaire floristique ont permis de dénombrer 28 espèces herbacées réparties dans 25 genres et 15 familles. Les plantes ligneuses comme *B. senegalensis*, *B. aegyptiaca* et *S. birrea* possèdent la flore la plus riche avec 18 espèces chacune, alors que *A. tortilis* et *A. senegal* ont respectivement 12 et 9 espèces. Le témoin est le moins diversifié avec 6 espèces herbacées. Parmi les herbacées, *Aristida mutabilis* est la plus fréquente contrairement à *Achyranthes aspera*, *Aristida adscensionis*, *Chloris barbata*, *Cleome viscosa*, *Cyperus esculentus*, *Datura metel*, *Eragrostis pilosa* et *Indigofera hirsuta* qui sont les espèces les moins fréquentes. Les résultats de l'AFC ont montré quatre groupements végétaux. Un premier groupement qui regroupe *B. senegalensis*, *A. raddiana* et le témoin, un groupement à *B. aegyptiaca*, un groupement à *A. senegal* et enfin un groupement à *S. birrea*. Cette étude a permis de mettre en évidence la valeur de la présence de l'arbre dans un système de production fortement dégradé.

© 2015 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés: Sénégal, Ferlo, interaction arbre - herbe, AFC, diversité floristique.

Annexe 2. Photos



Pots d'incubation pour détermination azote net



Filet pour étude retombée de litière



Sachets pour étude décomposition des litières

Résumé

L'objectif de cette étude est de caractériser la variabilité de la phénologie de cinq espèces ligneuses, *Acacia senegal* (L.) Willd, *Acacia tortilis* var. *raddiana* (Savi) Brenan, *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir., et *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst., et leur influence sur la minéralisation de l'azote, la biomasse microbienne et la diversité floristique des herbacées dans le Nord Ferlo, Sénégal. Les cinq espèces ligneuses ont été choisies parmi les essences retenues pour la restauration des écosystèmes sahéliens dans le cadre du projet de reforestation panafricaine de la Grande Muraille Verte.

L'expérimentation a été réalisée à Widou situé au Nord du Sénégal. Le suivi de la phénologie (feuillaison, floraison et fructification) a été effectué par des observations qualitatives et des mesures quantitatives. La teneur du sol en azote minéral ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ et $\text{NO}_3^-\text{-N}$) et la biomasse microbienne ont été déterminées hors et sous-houppiers des arbres durant 9 mois. La collecte des litières a été effectuée pendant un an sous-couvert des arbres et l'étude de la perte de masse des litières a été suivie durant 16 mois. Pour les mesures de la biomasse herbacée, nous avons procédé à un inventaire des espèces herbacées sous-couvert et hors-couvert des plantes ligneuses. Une analyse floristique qualitative (familles, genres et espèces) a été réalisée à partir de la liste floristique des différents inventaires couplée à une approche quantitative utilisant le coefficient de similitude de Sørensen (1948). Les résultats ont montré qu'il y a une variabilité interspécifique et intraspécifique de la phénologie des espèces. La concentration en azote minéral ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ et $\text{NO}_3^-\text{-N}$), la biomasse microbienne, la biomasse herbacée, la perte de masse et la chute de litière varient selon les traitements. Les concentrations en azote minéral les plus élevées ont été observées chez *B. senegalensis* en octobre 2015 ($53,90 \mu\text{g N g}^{-1} \text{sol}$) et *B. aegyptiaca* ($45,32 \mu\text{g N g}^{-1} \text{sol}$) en août 2014 à $P \leq 0,05$ tandis que la biomasse microbienne la plus élevée a été notée chez *B. aegyptiaca* ($53,67 \text{ mg C kg}^{-1} \text{sol}$) en octobre 2014 et chez l'*A. senegal* ($49 \text{ mg C kg}^{-1} \text{sol}$) en janvier 2015. Les quantités de litières sous *B. senegalensis* ($39,3 \text{ t ha}^{-1}$) étaient significativement plus élevées que celles des autres espèces ligneuses ($P \leq 0,05$). Le pourcentage de perte de masse des litières le plus élevé a été noté chez l'*A. tortilis* var. *raddiana* (70%) et les plus faibles chez *S. birrea* (44%) et *B. aegyptiaca* (52%). Les résultats de l'inventaire floristique ont permis de dénombrer 29 espèces végétales herbacées qui se répartissent entre 25 genres et 15 familles. Les espèces ligneuses comme *B. senegalensis*, *B. aegyptiaca* et *S. birrea* possèdent la flore la plus riche avec 18 espèces chacune, alors que *A. tortilis* var. *raddiana* et *A. senegal* ont respectivement 12 et 9 espèces. Le témoin est le moins diversifié avec 6 espèces herbacées.

Les résultats de cette étude montrent que l'implantation de la GMV dans la zone semi-aride du Ferlo, permet de réhabiliter les sols dégradés en améliorant la disponibilité des éléments nutritifs notamment l'azote minéral et la diversité de la végétation herbacée.

Mots-clés: Phénologie, Décomposition, Minéralisation N, Biomasse herbacées, Diversité floristique, Interaction arbre - herbe, Grande muraille verte, Ferlo, Sénégal.