



Rapport du projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de

Master Agroforesterie Ecologie et Adaptation (AFECA)

Influence des arbres sur les teneurs en carbone et azote du sol dans la zone sylvopastorale du Sénégal

Présenté par

N'GORAN Adjoua Ange-jokébed

et soutenu publiquement le 9 août 2018

Encadreurs :	Drs	Simon TAUGOURDEAU	Chercheur	CIRAD
		Abdoul DIOUF	Chercheur	CSE
		Aziz DIATTA	Maître-Assistant	UCAD



Remerciements

Les recherches qui font l'objet de ce mémoire ont été menées au Pôle Pastoralisme et Zones Sèches (PPZS) de Dakar (Sénégal). Ces travaux ont été codirigés par :

- Dr Simon TAUGOURDEAU, chercheur du CIRAD-UMR SELMET (Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux à l'ISRA LNERV-DP PPZS, mon encadreur de terrain ;
- Dr Abdoul Aziz DIOUF, naturaliste au Centre de Suivi Ecologique du Sénégal (CSE), mon encadreur de terrain ;
- Dr Sékouna DIATTA, Enseignant-chercheur au Laboratoire d'Écologie & d'Éco-hydrologie du Département de Biologie végétale à la Faculté des Sciences & Techniques (FST) de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), mon encadreur pédagogique.

Je tiens à leur exprimer tous mes remerciements pour les encouragements, la rigueur dans le travail et surtout la confiance qu'ils m'ont accordée tout au long de ces mois de stage. Je tiens également à remercier de manière particulière, Dr Christian CORNIAUX du PPZS, qui a su porter un intérêt à ma candidature pour un stage et m'a recommandé pour la réalisation de cette étude.

Je présente aussi mes sincères remerciements aux Dr Laurent CURNAC, Dr Lydie CHAPUIS-LARDY, Chercheurs à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Experts en Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des Sols & Agroécosystèmes, Mme Patricia MOULIN, responsable du laboratoire LAMA et à Dr Habibou ASSOUMA, Agronome forestier spécialiste de l'écologie et du bilan carbone des territoires pastoraux tropicaux, qui m'ont fait l'honneur de consacrer de leur temps à la supervision de mon travail depuis la conception du protocole, jusqu'à la présentation des résultats de nos travaux. Mes remerciements vont également à l'égard de Morgane DENDONCKER qui n'a pas hésité à consacrer de son temps pour nous aider dans la réalisation de ce travail et la cartographie effectué sur ArcGis.

Merci du fond du cœur à M. Juste DJAGOUN, stagiaire au PPZS ; M. Mame Mor MBODJ, expert forestier au CSE ; M. Moustapha DIA, chauffeur au PPZS ; M. Babacar SARR, chauffeur au CSE avec lesquels nous avons réalisé la phase de terrain.

J'adresse aussi toute ma gratitude à :

- tous les acteurs rencontrés durant la phase de terrain pour leur aide durant les prélèvements des échantillons de sol;
- aux directions des services forestiers et vétérinaires de Malem Niani, de Tambacounda, de Malem Hodar, de Goudiry, de Payar, de Yare Lao et de Patouki, pour leur hospitalité;
- au chef du village de Mboung et sa communauté pour leur hospitalité, particulièrement à son fils qui nous a prêté sa case pour passer la nuit;

- au gardien du forage de Gadliobe qui nous a permis de camper dans le local dont il a la responsabilité;
- aux techniciens du LMI IESOL du campus de Bel-air, pour les conseils et le partage d'expériences durant les manipulations aux laboratoires pour l'acquisition des données spectrales ;
- aux agents de l'ISRA et du PPZS, particulièrement à Mme Fatima DEMBELE ;
- aux agents du CSE pour leur conseil et leur partage d'expérience durant la préparation et réalisation des missions de terrain.

Par ailleurs, la réalisation de cette étude n'aurait pas été possible sans l'opportunité qui m'a été offerte par le Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'adaptation à la Sécheresse (CERAAS) et le Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) à travers le programme de bourse de master auxquelles j'adresse mes remerciements les plus chaleureux.

À mes condisciples et membres de master Agroforesterie Écologie et Adaptation, particulièrement à Gildas ASSOGBA et Espoir GAGLO, à mes amis bénéficiaires de la bourse, j'exprime ma reconnaissance.

Mes sincères remerciements au Département de Biologie Végétale pour la formation que nous avons reçu ainsi qu'aux membres du jury : Dr Daouda NGOM et Dr Aliou NDIAYE pour avoir accepté de juger de la qualité scientifique de ce document.

Je finirai par embrasser mes parents, mes frères et sœurs, leur dire combien je les aime. Vous qui m'avez toujours soutenue tout au long de mon parcours ...

Merci enfin à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail.

Sommaire

Remerciements.....	i
Sommaire	iv
Listes des illustrations	v
Liste des figures	v
Liste des tableaux.....	vi
Liste des annexes	vi
Résumé.....	vii
Abstract	viii
Introduction.....	1
Chapitre 1 : Revue bibliographique.....	3
1.1. Importance des arbres dans l'écosystème.....	3
1.2. Azote et carbone du sol.....	4
1.3. Méthode d'évaluation des teneurs en carbone et azote des sols	5
Chapitre 2 : Méthodologie.....	7
2.1. Présentation de la zone d'étude et du dispositif « site de contrôle au sol »	7
2.2. Échantillonnage et dispositif de prélèvement de sol.....	11
2.3. Passage au SPIR et prédiction des teneurs	13
2.4. Calcul des stocks de carbone et d'azote organiques.....	14
2.5. Analyse chimique des échantillons	15
2.6. Analyses statistiques des données	15
Chapitre 3 : Résultats.....	17
3.1. Qualité des prédictions.....	17
3.2. Analyse comparative des teneurs en C, en N et du rapport C/N sous et hors houppier	18
3.3. Analyse comparative des teneurs en C, en N et du rapport C/N en fonction de la profondeur .	19
3.4. Teneurs moyennes sous houppier par arbre	20
3.5. Relation entre les stocks et les facteurs environnementaux.....	22
Chapitre 4 : Discussion	26
4.1. Qualité des prédictions.....	26
4.2. Influence des arbres sur les teneurs.....	26
4.3. Corrélation entre les teneurs sous houppier et les caractéristiques des arbres.....	27
4.4. Variation des stocks en fonction des facteurs environnementaux.....	27
Conclusion et perspectives	29
Références bibliographiques.....	30
Annexes.....	i

Listes des illustrations

Liste des figures

Figure 1. Carte du Sénégal présentant la zone d'étude (Source : CSE ; Tapan et al., 2004)	7
Figure 2. Sites C3L2 à Yare Lao (a) et C2L1 situé à Tatki (b) dans l'écorégion pastorale sablonneuse du Nord	8
Figure 3. Sites C4L3 à Patouki (a) et C3L7 à Payar (b) dans l'écorégion pastorale ferrugineuse.....	8
Figure 4. Placettes situées à 200m (a) et à 600 m (b) du début de transect du site C2L6 au Ranch de Dolli	9
Figure 5. Site C2L8 situé à Delbi, représentant la zone d'expansion agricole	9
Figure 6. Sites C3L8 à Malem Niani et C4L8 à Tambacounda dans l'écorégion de transition orientale.	10
Figure 7. Marques des entrées de site (a) et des débuts de transect (b et c).....	11
Figure 8. Marques d'arbres repères sur une placette située à 200m (a) et à 600m (b) du début du transect.	11
Figure 9. Dispositif de prélèvement des échantillons hors houppier.....	12
Figure 10. Dispositif de prélèvement des échantillons sous houppier.....	12
Figure 11. Prélèvement au niveau de l'horizon 0-10 cm (a) de l'échantillon de sol (b) pour la détermination de la Da	13
Figure 12. Passage des échantillons au SPIR	14
Figure 13. Acp sur les données spectrales en fonction du type de sol.....	17
Figure 14. Corrélation entre les résultats de la prédiction et ceux du laboratoire des teneurs en carbone (a) et en azote (b)	18
Figure 15. Différence des teneurs en C sous et hors houppier entre 0-10 cm (a) et entre 10-30 cm (b) de profondeur, différence des teneurs en N sous et hors houppier entre 0-10 cm (c) et entre 10-30 cm (d) de profondeur et différence des ratios C/N sous et hors houppier entre 0-10 cm (e) et entre 10-30 cm (f) de profondeur.....	19
Figure 16. Différence des teneurs en C à 0-10 cm et 10-30 cm de profondeur sous houppier (a) et hors houppier (b), différence des teneurs en N à 0-10 cm et 10-30 cm de profondeur sous houppier (c) et hors houppier (d) Différence des ratios C/N C à 0-10 cm et 10-30 cm de profondeur sous houppier (e) et hors houppier (f).....	20
Figure 17. Acp sur les données de stock et les facteurs environnementaux.....	23
Figure 18. Interpolation des stocks totaux de C uniquement avec les coordonnées spatiales des sites à travers la zone sylvopastorale du Sénégal.....	24
Figure 19. Interpolation des stocks totaux de N uniquement avec les coordonnées spatiales des sites à travers la zone sylvopastorale du Sénégal.....	25
Figure 20. Interpolation du rapport Stock C sur stock N totaux uniquement avec les coordonnées spatiales des sites à travers la zone sylvopastorale du Sénégal	25

Liste des tableaux

Tableau 1. Descriptif des écorégions définies par Tapan et al en 2004 et comportant les sites d'étude ...	7
Tableau 2. Facteurs environnementaux de l'étude.....	16
Tableau 3. Corrélations entre les caractéristiques de l'arbre et les teneurs sous houppier	21
Tableau 4. Test Kruskalmc sur la teneur en C sous houppier au niveau de la profondeur 10-30 cm	21
Tableau 5. Test kruskalmc sur la teneur en N sous houppier au niveau de la profondeur 0-10 cm	22
Tableau 6. Test kruskalmc sur la teneur en N sous houppier au niveau de la profondeur 10-30	22
Tableau 7. Coefficients de corrélations entre les stocks et facteurs environnementaux	24

Liste des annexes

Annexe 1 . Teneur moyenne en carbone et azote par site.....	i
Annexe 2. Valeurs des stocks de carbone et azote observées et leur rapport.....	ii
Annexe 3. Données facteurs environnementaux	iii
Annexe 4 . P_value de corrélations entre les stocks et facteurs environnementaux au seuil de 5%	iii

Résumé

L'élevage pastoral au sahel est critiqué pour ses fortes intensités d'émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , N_2O , CH_4) et son impact néfaste sur le sol et la végétation (piétinement des animaux, surpâturage et prélèvements incontrôlés). Cependant, l'impact environnemental de ce type d'élevage pourrait être atténué par une augmentation des teneurs et des stocks de carbone (C) et d'azote (N) dans les sols à partir des interactions entre le sol et les plantes. En effet, durant la photosynthèse les végétaux transforment le CO_2 atmosphérique en biomasse. Cette biomasse retourne au sol sous forme de matière organique composée de litière et d'exsudats racinaires. La matière organique est ensuite décomposée en C et N et piégé dans le sol sous l'action des microorganismes. Au Sénégal, certaines études ont été réalisées sur la détermination de la dynamique des teneurs en C, en N et sur les stocks de C dans quelques zones du Ferlo sans toutefois couvrir toute la zone sylvopastorale du Sénégal. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence de la strate ligneuse sur les teneurs de C, de N du sol et d'identifier les facteurs environnementaux impliqués dans la variation des stocks de C et de N à travers la zone sylvopastorale du Sénégal. Pour ce faire, des prélèvements de sol ont été réalisés hors et sous houppier, au niveau des horizons 0-10 et 10-30 cm sur 15 sites de contrôles au sol du Centre de Suivi Ecologique sénégalais (CSE). Après tamisage et scanne des échantillons prélevés les teneurs de C et de N ont été prédites et les stocks calculés par l'utilisation de méthode analytique basées sur la spectroscopie infrarouge (SPIR). Les résultats ont montré que les teneurs sont plus élevées sous houppier que hors houppier, et qu'elles sont toujours plus fortes au niveau de l'horizon de surface 0-10 cm. Les stocks de C évoluent suivant un gradient Nord-Sud dans la zone sylvopastorale du Sénégal et sont influencés positivement par la pluviosité et la biomasse foliaire de la végétation. De plus, le rapport C/N présente des valeurs significativement plus élevées sous houppier que hors houppier et le rapport des stocks de C sur les stocks de N évolue suivant des gradients Nord-Sud et Est-Ouest. De cette analyse, il ressort que l'arbre impulse l'augmentation des teneurs de C et de N et l'activité biologique des sols mesurés. Cette amélioration est par ailleurs dépendante de la variabilité pluviométrique et de la production de matière organique du couvert végétal en zone sylvopastorale sahélienne.

Mots clés : Sahel, Zone sylvopastorale, Stockage, Carbone, Azote, Interactions sol-plantes

Abstract

Sahelian pastoral livestock systems are critical for their high greenhouse gas emissions (CO_2 , N_2O , CH_4) intensity (i.e. GHG emissions per unit of product) and its negative impact on soil and vegetation (trampling of animals, overgrazing and uncontrolled harvesting). However, the environmental footprint of this livestock systems could be mitigated by carbon (C) accumulation in the soils through interactions between animals, soil and plants. In fact, trees transform CO_2 into biomass through the photosynthesis process. This biomass returns to the soil as organic matter in the form of litter and root exudates. Organic matter is then decomposed into C and nitrogen (N) and trapped in the soil by the action of microorganisms. In Senegal, some studies have been achieved on the evaluation of the dynamics of C&N contents and C stocks in some regions within the pastoral zone (Ferlo) without covering the whole sylvopastoral zone in Senegal. The aim of this study is to determine the influence of woody stata on soil C and N contents and to identify the drivers of C and N stocks variation across the soil in the sylvopastoral zone. To achieve this goal, soil samples were taken outside and under tree crowns at two depths (0-10 and 10-30 cm) at fifteen sites monitoring of the Center of Senegalese Ecological (CSE) for biomass production. After scanning soil samples using the near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) approach, the C and N contents were predicted and the stocks calculated. The results show that the C and N contents are higher under the crowns, and are always higher at the top horizon (0-10 cm). C stocks are evolved along a north-south gradient across the sylvopastoral zone of Senegal and are positively influenced by rainfall and leaf biomass. Furthermore, the report C/N is significantly higher under than outside tree crowns and the report of the stocks of C on the stocks of N evolves along the North-South and East-West gradients. From this analysis, it appears that the trees contribute to the increase of the content of C and N and to the soils biological activity. This improvement is function of rainfall variability and organic matter of the plant cover in the Sahelian sylvopastoral zone.

Keywords: Sahel, Sylvopastoral zone, Carbon, Nitrogen, Soil, Tree

Introduction

Le changement climatique s'est accru du fait de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère suite aux activités anthropiques (Edenhofer et *al.*, 2014; Guesnerie, 2003). Ce réchauffement global de la planète induit la disparition de certains écosystèmes, l'acidification et l'élévation du niveau de la mer, la réduction de la biodiversité et la réduction des espaces cultivables (Edenhofer et *al.*, 2014). Le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄), sont les principaux gaz à effet de serre émis par le secteur de l'élevage (Edenhofer et *al.*, 2014). Leur concentration dans l'atmosphère est telle qu'elle ne l'avait jamais été depuis ces 800 000 dernières années (Edenhofer et *al.*, 2014).

En 2013, la FAO confirmait l'importante contribution de l'élevage aux émissions de GES d'origine anthropique (Gerber et *al.*, 2013). Cette contribution s'élève à 14,5% des émissions mondiales et 2/3 des émissions de GES d'origine agricole (Gerber et *al.*, 2013). Les ruminants sont susceptibles d'émettre du méthane et de l'oxyde nitreux par la fermentation entérique et les déjections animales.

Cependant, l'élevage constitue une importante source alimentaire. Sur le plan mondial, il fournit le tiers des protéines alimentaires humaines et représente 40% de la valeur de production agricole brute mondiale (Lecomte et Blanfort, 2013). Selon les estimations de la FAO, les besoins en viande et lait doubleront en 2050 pour les pays du Sud (Gerber et *al.*, 2013).

Dans les pays sahéliens, l'élevage et en particulier le système pastoral, représente jusqu'à 40% du PIB agricole, 50% de la production de viande et 70% de la production de lait (Gerber et *al.*, 2012). En effet, la présence d'un climat aride à semi-aride et d'une végétation naturelle irrégulière instaurent le pastoralisme comme le système de production le mieux adapté à cette zone (Gerber et *al.*, 2012). Au Sénégal, il contribue de manière significative à l'économie avec un taux de 35 % (Gning, 2003) à 78 % de participation au PIB agricole (Hatfield et Davies, 2006). Ce système de production, qui repose essentiellement sur la mobilité des animaux, exploite les pâturages naturels qui constituent la base de leur alimentation (Akpo et *al.*, 2003; Diop, 2007). Ces parcours naturels sont formés d'une végétation herbacée continue et d'une strate arborée et arbustive plus ou moins éparse (Akpo et Grouzis, 2000) .

Au sahel, les arbres contribuent à l'apport de protéines, de minéraux et de vitamines indispensables à l'équilibre alimentaire des hommes et des animaux surtout en période de soudure. Ils fournissent également divers autres services écosystémiques de types énergétiques, médicinales, économiques et environnementaux. Ils contribuent aussi à l'accroissement de la productivité des terres et au maintien de l'équilibre des écosystèmes (Ngom et *al.*, 2013).

Néanmoins, à l'instar de l'élevage à l'échelle mondiale, ces systèmes sont souvent critiqués en rapport avec la transhumance et son impact sur le climat (Gerber et *al.*, 2013). En effet, les systèmes pastoraux

étant très peu productifs, leurs émissions rapportées à la production (kg de viande ou litre de lait) sont les plus importantes du monde (Assouma et *al.*, 2014).

La variabilité spatio-temporelle de la production de biomasse caractérisant ces écosystèmes, ne permet pas toujours de garantir la disponibilité de l'offre fourragère sur une année entière. Il s'en suit un déplacement des animaux et des éleveurs pour une transhumance en saison sèche. La croissance démographique et l'empiétement des cultures sur les pâturages limitent la mobilité des éleveurs. Ce-ci induit l'érosion des sols, l'appauvrissement des sols, la détérioration de la couverture végétale, la destruction de la matière organique, l'émission de carbone et les dépôts d'azote (Steinfeld et *al.*, 2009).

Cependant, ces émissions pourraient être compensées par le stockage de carbone dans les écosystèmes pastoraux (Assouma, 2016). A travers la photosynthèse les plantes absorbent le CO₂ atmosphérique et la transforment en biomasse. Cette matière est retournée au sol par la litière, les résidus de récoltes, les rhizodépôts et les déjections animales. La présence de la végétation sur le sol favorise l'absorption à long terme, bien que lente du dioxyde de carbone issu de l'atmosphère dans le sol (Blanfort et Stahl, 2013; Noble et *al.*, 2000; Steinfeld et *al.*, 2009; Watson et *al.*, 2000).

En outre, la matière organique du sol permet le stockage et la mise à disposition de l'eau et des nutriments pour les plantes et la nutrition des microorganismes des sols (Lecomte et Blanfort, 2013). L'azote du sol favorise la croissance des plantes et joue aussi un rôle déterminant dans leurs productions. Ainsi le stockage de carbone et d'azote dans le sol est non seulement favorable à l'atténuation du réchauffement climatique, mais également nécessaire pour le bon fonctionnement de l'évaporation et la fertilité des sols (Blanfort et *al.*, 2013; Powlson et *al.*, 2011).

Certaines études ont été réalisées pour déterminer la dynamique des teneurs en carbone et azote du sol et des stocks de carbone du sol dans quelques zones du Ferlo sans toutefois couvrir toute la zone pastorale du Sénégal (Akpo et *al.*, 2005; Ndiaye et *al.*, 2015; Woomer et *al.*, 2004). La zone pastorale au Sénégal couvre une large bande pédoclimatique couvrant le nord et l'est du pays. Le stock de carbone dans la biomasse aérienne y est évalué par le centre de suivi écologique (CSE) sénégalais depuis 1987 sur 24 sites de suivi écologique sans toutefois évaluer celui du sol.

L'objectif général de ce travail est d'évaluer l'influence de la strate ligneuse sur le sol en zone sylvo pastorale. De manière spécifique il vise à identifier l'impact des arbres sur les teneurs en carbone et azote du sol à travers la zone sylvo pastorale du Sénégal et d'identifier les facteurs environnementaux impliqués dans la variation de ces stocks.

La rédaction de ce travail est faite suivant un plan en quatre chapitres. Le premier est consacré essentiellement à la revue de littérature. Il présente une synthèse des recherches effectuées sur les axes thématiques de l'étude. Le deuxième chapitre, traite de la méthodologie adoptée. Le troisième chapitre expose les résultats. Le dernier chapitre confronte et discute nos résultats avec d'autres résultats d'études publiés.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

1.1. Importance des arbres dans l'écosystème

Maintes études témoignent de l'intérêt des arbres pour la conservation de la biodiversité, la lutte contre les changements climatiques, l'amélioration de la résilience des populations, la restauration des sols, et la préservation de l'humanité.

Du point de vue économique et socio-culturel, les arbres sont sources de produits commercialisables tels que les fruits, le bois, les fourrages, et les produits médicinaux. Par la gestion qui en est faite, ils rendent des services esthétiques dans le cadre du tourisme et l'aménagement des espaces verts (jardins botaniques, sites de détente ...). Ces bienfaits permettent aux populations de diversifier leurs revenus et d'améliorer leurs systèmes de production pour une meilleure résistance aux changements climatiques. En zone de savane africaine, les populations diversifient leurs revenus en ramassant le bois de chauffage, les fruits, les épices, les fourrages pour les vendre (Djoudi et *al.*, 2013; Paavola, 2008; Poupon, 2013; Tougiani et *al.*, 2009). En Afrique sahélienne, la production fourragère des arbres et arbustes est souvent le seul recours pour les éleveurs lors des périodes de soudure (Besse et *al.*, 1998). En plus d'être une source d'aliments, de produits sanitaires et énergétiques, les arbres servent de lieu de rencontre pour résoudre les conflits, pour les activités récréatives et la fourniture de matériaux de construction.

Du point de vue écologique, les arbres permettent, par l'augmentation de l'évaporation d'accélérer l'évacuation de l'excès d'eau dans les parcelles agroforestières (Verchot et *al.*, 2007). Ils contribuent à la régulation du cycle de l'eau, à une bonne structuration des sols, à une bonne régulation de la température et ils servent d'habitats aux pollinisateurs sauvages et aux prédateurs des ravageurs agricoles (Gabriele, 2013). Ils peuvent fournir des services d'ombrage, de refroidissement, d'interception, de stockage et d'infiltration des pluies (Akpo et Grouzis, 2000). Une étude menée au Niger montre que la réduction du ruissellement de l'eau de pluies et la création d'un microclimat en milieu urbain peuvent être corrélée avec l'augmentation du couvert végétal (Gill et *al.*, 2007; Herz, 1988). Au sein des systèmes agroforestiers (association arbres, cultures et/ou élevages), les arbres constituent des moyens de lutte contre l'érosion éolienne et hydrique, ainsi que la désertification. Ils favorisent la conservation de la fertilité des sols, la régénération des sols dégradés et une utilisation efficace des ressources en eau (Besse et *al.*, 1998; Pramova et *al.*, 2012). À partir de son système racinaire, l'arbre puise en profondeur l'eau et les nutriments et les rend disponibles pour les cultures. Ils constituent également des puits de carbone pour la réduction des gaz à effet de serre par la photosynthèse (Lessard et Boulfroy, 2008). Ils peuvent également favoriser le stockage de carbone et d'azote dans le sol (Blanfort et *al.*, 2013; Steinfeld et *al.*, 2009).

1.2. Azote et carbone du sol

Selon Feller et *al.* (2012) la présence du carbone et de l'azote dans le sol peut être assimilée à l'une des conséquences du stockage de la matière organique. La matière organique du sol (MOS) correspond à l'ensemble des matériaux organiques, vivants et morts, présents dans le sol. Ce sont entre autres, les racines des plantes, les microorganismes et la microfaune du sol et les résidus de végétaux décomposés ou non (Bernoux et *al.*, 2013).

La principale source primaire de matière organique est la photosynthèse qui est assurée par les plantes en exploitant la lumière du soleil. Les apports organiques au sol sont d'origine végétale dans la plupart des agroécosystèmes, et se font à la surface du sol (chute de feuilles, résidus de culture, apports exogènes dans les sols agricoles) et dans les horizons superficiels où la densité racinaire et l'activité biologique sont les plus importantes. Les débris végétaux sont ensuite décomposés sous l'action des microorganismes (bactéries, champignons) et de la microfaune à travers deux mécanismes ; la minéralisation et l'humification.

Ces processus permettent d'obtenir les éléments minéraux principaux (C, N, H, O) ou secondaires (P, Mg, Ca, K, et les oligoéléments). Le carbone organique du sol représente 50% des éléments contenus dans la MO (Bernoux et *al.*, 2013). En plus de la forme organique, le carbone existe également sous forme minérale appelée carbone inorganique. Le carbone organique stocké dans les sols mondiaux est estimé entre 2 000 et 2 500 Gt dont 27 à 36 % dans les zones sèches. Le carbone inorganique stocké s'élève à 950 Gt avec une proportion de 97 % contenue dans les zones sèches (Bernoux et *al.*, 2013). De même que le carbone, l'azote existe sous les formes organiques et inorganiques; cependant majoritairement sous la forme organique (95% du pool d'azote total du sol) (Andrianarisoa, 2009). Comparativement au carbone, le cycle de l'azote dans l'écosystème sol-plante est fonction des microorganismes de la rhizosphère qui réalisent des symbioses avec les plantes et fixent l'azote atmosphérique (rhizobium).

Durant la décomposition des résidus végétaux, les cycles du carbone et de l'azote dans les sols sont fortement couplés, principalement en raison de l'assimilation simultanée de C et N par la microflore hétérotrophe des décomposeurs (Aita, 1996). Ces cycles dépendent fortement de conditions environnementales incluant le climat et les propriétés du sol (Butterbach-Bahl et *al.*, 2011). Il existe un seuil de disponibilité en azote minéral au-dessous duquel l'azote contrôle la vitesse de décomposition du carbone. Aussi le stockage du carbone peut être lié dans certaines situations à une émission plus grande de N₂O (Powlson et *al.*, 2011), une forte teneur d'azote peut entraîner du sol une émission d'azote et de carbone. Les besoins en N de la microflore sont déterminés par le flux de C et le rapport C/N (Aita, 1996). Le rapport C/N est un indicateur de l'activité biologique du sol. Il renseigne sur le degré moyen d'évolution de la matière organique, l'activité biologique et le potentiel de minéralisation de l'azote. Plus le rapport C/N est élevé (supérieur à 10), plus l'activité biologique et la minéralisation de l'azote sont réduites et l'humification augmente (Soltner, 2000).

En zone pastorale, les flux de carbone dépendent fortement de l'intensité de pâture (Freibauer et *al.*, 2004; Soussana et *al.*, 2010). Pour une intensité comprise entre 15 et 50%, le carbone consommé par les animaux est retourné au sol par les fèces et conduit au recyclage du carbone. Cependant, la consommation des feuilles par les animaux peut entraîner la réduction de la capture du CO₂ par les plantes (De Mazancourt et *al.*, 1998). Les stocks de carbone, d'azote et de matière organique sont fortement dépendants de la texture du sol (argile et limon) (Bationo et *al.*, 2005). En milieu tropical, le climat, l'activité biologique, le passage du feu et la texture dans le cas de sols sableux, maintiennent un stock organique très bas, même dans les écosystèmes non anthropisés (Menaut et *al.*, 1985; Moureaux, 1967).

1.3. Méthode d'évaluation des teneurs en carbone et azote des sols

Les teneurs en carbone et azote des sols peuvent être déterminées à partir de deux grands groupes de méthodes. Les analyses chimiques au laboratoire et la spectrométrie basée sur les mesures de réflectance dans les longueurs d'onde au niveau du proche et du moyen infrarouge (Genot et *al.*, 2014).

1.3.1. Les méthodes analytiques

Les méthodes analytiques de types chimiques, comprennent l'oxydation par voie humide (comme la méthode de Walkley-Black et la méthode Anne) et les méthodes de combustion avec dosage du CO₂ produit (par titrimétrie, conductimétrie) (Bernoux et *al.*, 2013).

Le principe des méthodes par oxydation est le dosage direct du carbone organique après oxydation de la matière organique par du bichromate de potassium en excès, en milieu sulfurique et à 135°C. Cependant, l'oxydation peut être incomplète et donc ne permet d'extraire qu'une partie du carbone organique ; ce qui semble être le cas surtout pour les sols tropicaux ou riches en carbonates.

La méthode de combustion consiste en une micro-pesée, une combustion « éclair », une séparation chromatographique de l'azote moléculaire et du dioxyde de carbone, et une détection par conductibilité thermique (Bernoux et *al.*, 2013). Les échantillons doivent être finement broyés (inférieur à 200 µm) pour une meilleure représentativité de l'échantillon mesuré du fait des faibles masses de sol utilisées pour l'analyse. Cela en plus des équipements nécessaires (une micro balance, un chromatographe catharomètre appelé CHN qui doivent être amorti, le coût des gaz vecteurs, des consommables ...) alourdit le travail et rend cette méthode onéreuse : 15 euros contre 2.5 par échantillons pour celle Walkley-Black (O'Rourke and Holden, 2011).

1.3.2. Les estimations à l'aide de la Spectrométrie Proche Infrarouge (SPIR)

La spectrométrie infrarouge (proche ou moyen IR) est la mesure de la diminution de l'intensité du rayonnement qui traverse un échantillon en fonction de la longueur d'onde.

Cette méthode peut être utilisée pour estimer les teneurs en C et en N des sols sans préparation préalable des échantillons. Elle nécessite néanmoins une main d'œuvre qualifiée et un équipement spécifique ainsi qu'un calibrage réalisé à partir de bases de données de référence (Bernoux et *al.*, 2013).

La spectrométrie proche infrarouge (SPIR ou en anglais NIRS, Near infrared reflectance spectroscopy) est la mesure entre 1000 et 2000 nm de longueur d'onde. Elle est aujourd'hui connue comme une méthode émergente d'analyse de sol, notamment pour la détermination de la teneur en matière organique (Genot et *al.*, 2014). Il est prouvé par plusieurs études que la méthode spectrale proche infrarouge s'avère être par rapport à la méthode chimique, plus rapide, rentable, et non destructive et parfois plus précise pour certains cas de mesures de propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Genot et *al.*, 2014). Sun et al. (2014), dans une étude comparative des deux méthodes (spectrales et chimiques) basées sur des échantillons de sol prélevés sur des sites de pâturage, ont montré que la méthode spectrale serait appropriée pour la détermination des teneurs en carbone organique et en azote total du sol. Cette méthode se base sur trois principales étapes :

- **Constitution d'une base de données de référence** : en partant d'analyses classiques de laboratoire sur des échantillons de même nature on constitue une base de données avec le couple spectre/valeurs de référence. La taille de cette base de données est un élément déterminant dans la robustesse du modèle qui sera élaboré. Cette base de données est ensuite divisée en deux jeux de données utilisés respectivement pour la calibration et la validation.

- **Calibration du modèle de prédiction** : les équations de calibration sont développées en utilisant des techniques de régression aux moindres carrés partiels (PLS). Les données spectrales acquises pour chaque échantillon sont généralement prétraitées et mises en calibration et validation croisée dans le logiciel (Winisi, Infracsoft) pour chacune des composantes chimiques à prédire.

- **Validation du modèle** : le set de validation constitué est utilisé pour la validation des calibrations afin de tester ces équations sur un lot d'échantillons indépendant. Pour la validation du modèle, le coefficient de détermination (R^2), l'écart type résiduel de la validation croisée (SECV), l'écart type résiduel de la prédiction (SEP) et le ratio performance/déviations (RPD) ont été calculés. Sont retenus les modèles qui présentent un $R^2 > 0,5$ et un $RPD > 2$.

Le spectre infrarouge est par ailleurs influencé par les caractéristiques physiques du sol. La taille et la forme des particules, l'espace entre celles-ci et leur arrangement affectent la longueur de la transmission lumineuse atteignant l'échantillon et donc son absorbance. Afin d'homogénéiser la taille des particules, les échantillons sont souvent tamisés avec un tamis de 2mm de diamètre.

Chapitre 2 : Méthodologie

2.1. Présentation de la zone d'étude et du dispositif « site de contrôle au sol »

2.1.1. Présentation de la zone d'étude

L'étude a été menée sur 15 sites de contrôles au sol du Centre de Suivi écologique du Sénégal (CSE). Ces sites sont situées dans 5 écorégions selon le découpage des écorégions de Tappan *et al.* (2004) (Figure 3 et Tableau 1). Ce sont la région pastorale sablonneuse du nord, la région pastorale ferrugineuse, la région pastorale sablonneuse du sud, la région de transition orientale et la région d'expansion agricole.

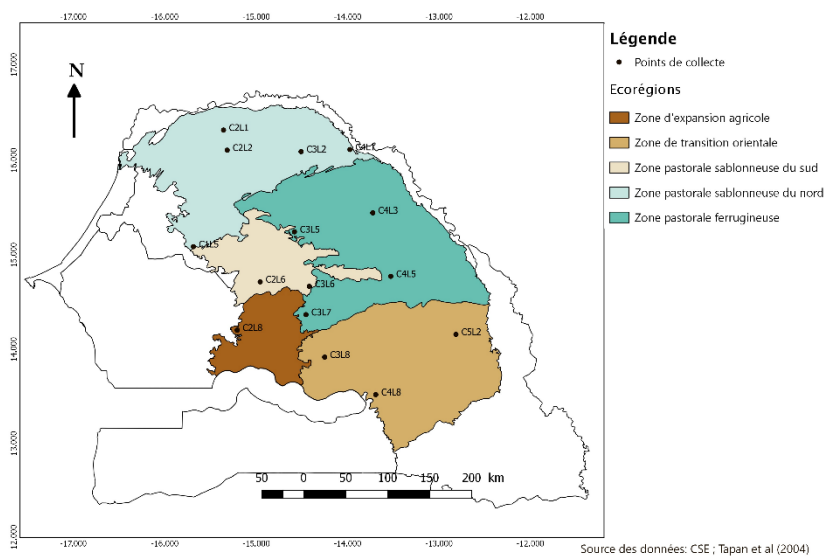


Figure 1. Carte du Sénégal présentant la zone d'étude (Source : CSE ; Tappan *et al.*, 2004)

Tableau 1. Descriptif des écorégions définies par Tappan *et al* en 2004 et comportant les sites d'étude

Région	Pluviosité	Type de sol	Végétation prédominante	Sites
Région pastorale Sablonneuse du Nord	150-300 mm	Sols sablonneux rouges-bruns et sols sablonneux tropicaux ferrugineux	Steppes d'arbuste et Prairies	C2L1, C3L2, C4L1, C2L2, C1L5
Région pastorale Sablonneuse du sud	300-500 mm	Sols sablonneux tropicaux ferrugineux	Arbuste et savane arborée	C2L6, C3L6
Région pastorale ferrugineuse	300-600 mm	Sols tropicaux ferrugineux glaiseux et graveleux peu profonds et lithosols ; profond, sablonneux à sols ferrugineux tropicaux glaiseux, filtrés dans les vallées	Savanes arbustives et sols nus, souvent relativement denses	C3L5, C3L7, C4L3, C4L5
Région de transition orientale	500-600 mm	Sols glaiseux et graveleux peu profonds (sablonneux à sols ferrugineux tropicaux glaiseux)	Savanes arborées et savanes boisées avec de petites zones de production agricole	C5L2, C3L8, C4L8
Région d'expansion agricole	500-800 mm	Sols glaiseux et graveleux peu profonds (sablonneux à sols ferrugineux tropicaux glaiseux)	Arbuste et arbres dégradés, quelque peu plus dense dans le sud; occupation agricole Parc dans les larges vallées et Terrasses	C2L8

La région pastorale sablonneuse du nord est une zone peu arrosée (150-300mm/an). La saison des pluies y est irrégulière. La végétation est constituée d'arbustes et d'arbres dispersés avec une prédominance du genre *Acacia sp.* Généralement trop sèche pour l'agriculture, la région est principalement utilisée pour le pâturage. Cependant, le sol profond, sablonneux, avec une grande capacité de stockage d'eau, a aidé à modérer les effets de la sécheresse sur la végétation boisée. Les sites de l'étude représentés dans cette zone sont C2L1, C3L2, C4L1, C2L2, et C1L5 (Figure 4). Une analyse de l'utilisation des terres montre qu'il y a une expansion des terres agricoles de 1964 à 1999 (1% à 16%) dans la zone (Tappan *et al.*, 2004).

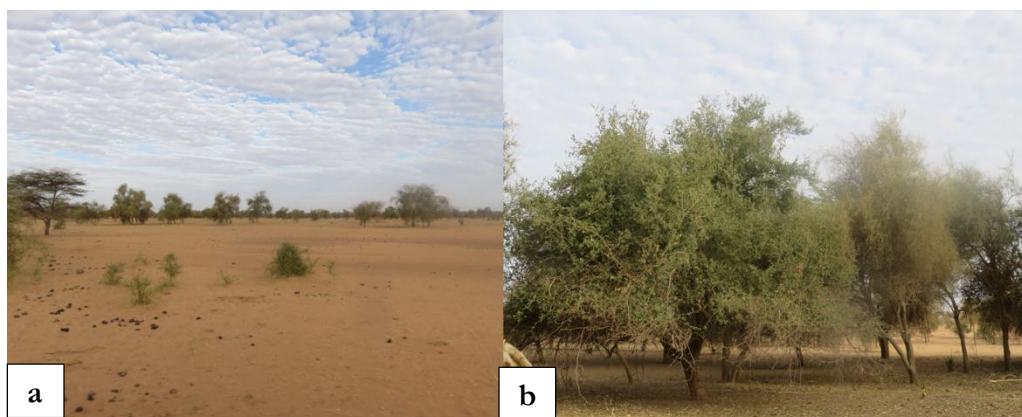


Figure 2. Sites C3L2 à Yare Lao (a) et C2L1 à Tatki (b) dans l'écorégion pastorale sablonneuse du Nord

Dans la région pastorale ferrugineuse encore appelée 'Ferlo latéritique, les sols sont peu profonds, glaiseux, graveleux, et composés d'une croûte de latérite souvent impénétrable (Tappan *et al.*, 2004). Ces sols présentent un faible potentiel agricole et une faible disponibilité des ressources en eaux. De ce fait, cette région est à vocation pastorale prédominante, car elle dispose de pâturages disponibles en abondance. Cela favorise l'implantation dispersée et provisoire des éleveurs nomades et semi-nomades. Selon Tappan *et al.* (2004), cette zone a plus subi les effets de la sécheresse et est également l'une des moins peuplées du Sénégal. Malgré la faible expansion agricole de la zone et la stabilité de la couverture arborée ces dernières années, la tendance présente l'augmentation de sols dégradés de 0,3% en 1965 à environ 4,5% en 1999 (Tappan *et al.*, 2004). Les sites C3L5, C4L3, C4L5 et C3L7 appartenant à cette région sont ceux représentés ci-dessous (Figure 5).

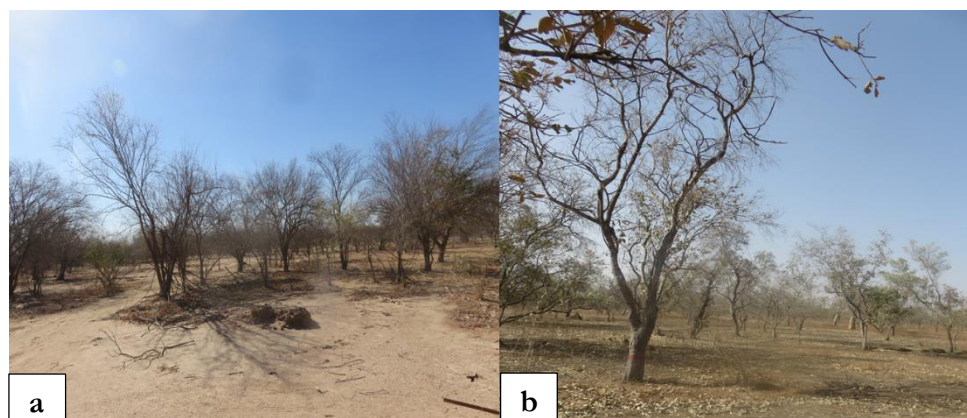


Figure 3. Sites C4L3 à Patouki (a) et C3L7 à Payar (b) dans l'écorégion pastorale ferrugineuse

La Région pastorale sablonneuse du sud partage beaucoup de ressemblance géomorphologique et pédologique avec la Région pastorale sablonneuse du nord, mais elle se distingue avec une pluviométrie plus élevée (Tableau 1). L'occupation humaine y est limitée parce que les sols sont peu profonds, peu praticables et l'accès à l'eau est difficile. Cette région regorge de prairies plus productives que l'écorégion pastorale sablonneuse du nord. La végétation prédominante est celle des arbustes et de la savane arborée. L'occupation des terres montre une expansion récente et rapide de l'agriculture dans la zone avec une augmentation des espaces cultivés (1,2% à 16,5% de 1965 à 1999). Les sites de l'étude représentés dans cette zone sont C2L6 et C3L6 (Figure 6).

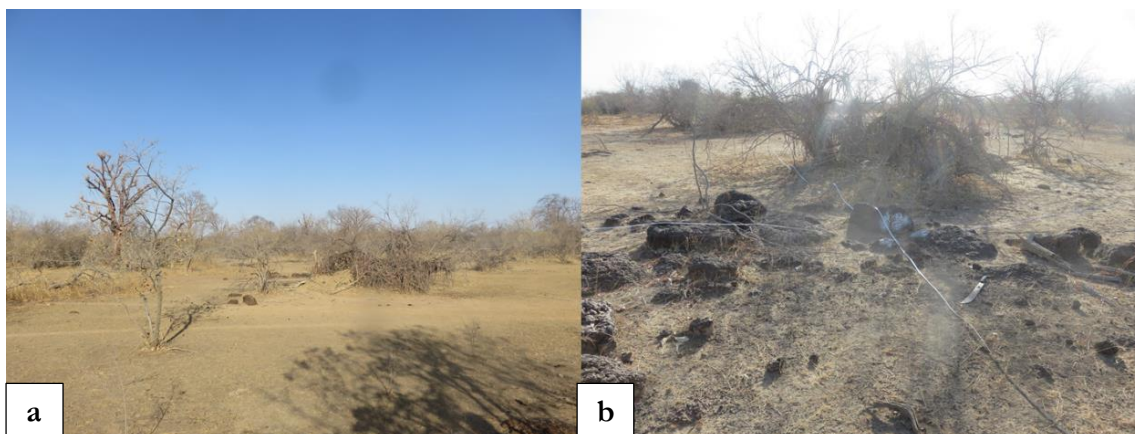


Figure 4. Placettes situées à 200m (a) et à 600 m (b) du début de transect du site C2L6 au Ranch de Dolli

La région d'expansion agricole est comme son nom l'indique une région où l'expansion agricole s'est faite au détriment de l'élevage. L'occupation agricole dans la zone est passée de 35,4% en 1965 à 64,6% en 2000. Elle bénéficie de la pluviométrie la plus élevée parmi les cinq régions de l'étude (Tappan et *al.*, 2004). Elle est constituée de savanes arborée et arbustive et est représentée par le site C2L8 (Figure 7).



Figure 5. Site C2L8 situé à Delbi, représentant la zone d'expansion agricole

La région de transition orientale est biologiquement et physiquement semblable à la région d'expansion agricole. Elle se différencie de celle-ci par un peuplement moins dense du fait de la prédominance des plateaux latéritiques dans la région. Avec l'expansion de la production de charbons de bois tirés des savanes arborées, cette région est aujourd'hui la source primaire de bois de chauffage du Sénégal, principalement sous forme de charbon de bois.

Cette activité ajoutée à l'expansion agricole (cultures d'arachides et de coton), au surpâturage, à la topographie et à la forte érosion hydrique a entraîné une baisse de la couverture boisée ; induisant *de facto*, la disparition d'une des plus grandes et plus denses forêt-galeries de la région et l'apparition des terres nues et dégradées (Tappan et *al.*, 2004). Elle comprend les sites C5L2, C3L8 et C4L8 (Figure 8).

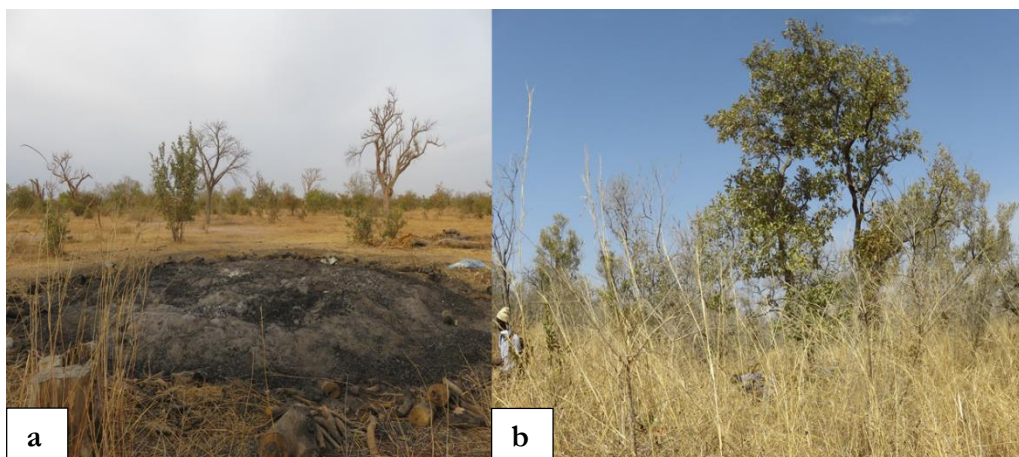


Figure 6. Sites C3L8 à Malem Niani et C4L8 à Tambacounda dans l'écorégion de transition orientale

2.1.2. Dispositif « Sites de contrôle au sol »

Les 15 sites ont été établis en 1987 sur la base d'une subdivision du paysage sénégalais en lignes et colonnes numérotées. Ainsi, le nom d'un site est constitué du numéro de ligne précédé du numéro de colonne (CxLy) de façon croissante suivant un gradient Nord-Sud pour y et Ouest-Est pour x. Le site C1L1 étant le site le plus au Nord et à l'Ouest. Les sites ont une dimension de 3*3 km et sont répartis dans la zone pastorale du Sénégal. Sur chaque site, un transect de 1km a été défini. L'entrée du site et de celle du transect ont été marquées avec de la peinture blanche (Figure 1). Chaque année à la fin de la saison des pluies (Septembre-Octobre), une mesure de la biomasse herbacée le long du transect via la méthode du double échantillonnage stratifié ainsi que l'inventaire des espèces arborées sont réalisés par le CSE. Ces mesures sont réalisées à chaque 200 m suivant le transect sur des placettes circulaires de 20m de rayon. A l'image des entrées de site et de transect, les placettes sont marquées par des arbres repères comportant des bandes rouges sur les troncs (Figure 2). Ces arbres ont été prédéfini par le CSE suivant qu'ils soient relativement grand et proche du centre la placette. L'inventaire des espèces arborées est effectué dans ces placettes. La biomasse foliaire est ensuite estimée via des équations allométriques. Nous avons effectué nos prélèvements de sol durant la saison sèche (Février-Mars) sur les 15 sites ayant été visités par le CSE en 2017.

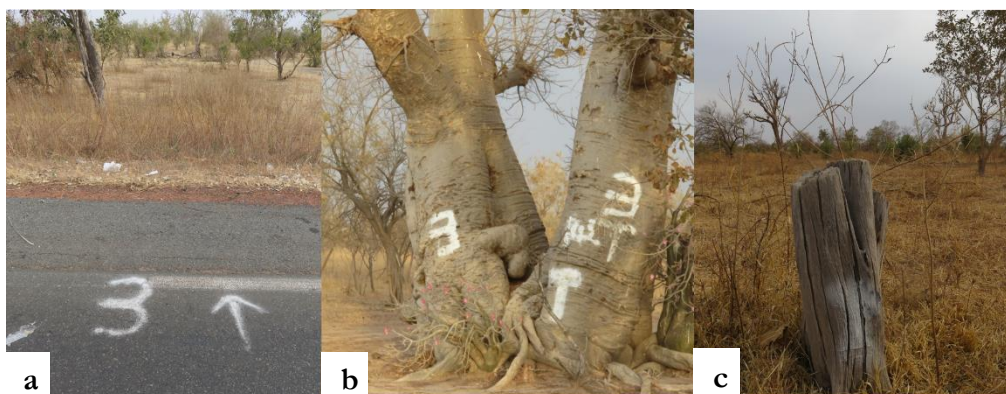


Figure 7. Marques des entrées de site (a) et des débuts de transect (b et c)

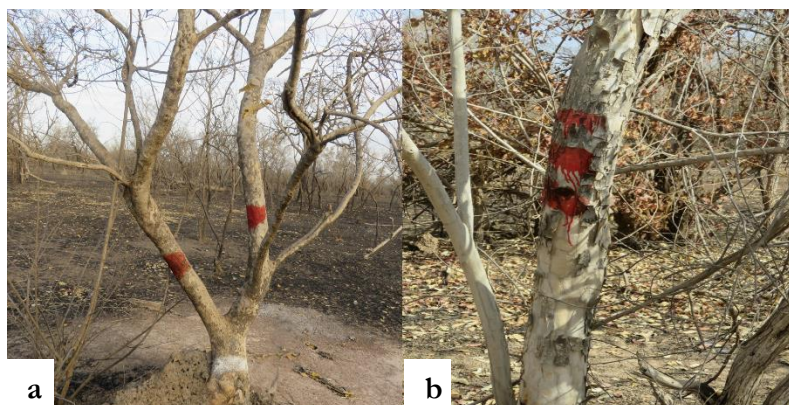


Figure 8. Marques d'arbres repères sur une placette située à 200m (a) et à 600m (b) du début du transect.

2.2. Échantillonnage et dispositif de prélèvement de sol

Les échantillons de sol ont été prélevés sous arbres et en dehors du couvert des arbres suivant deux profondeurs : de 0 à 10 cm et de 10 à 30 cm.

Le prélèvement des échantillons a été fait par implémentation de la méthode proposée par Clark et Evans (1954) connue sous le nom de méthode du point centré quadrant.

Ainsi, sur chaque site, après avoir identifié les placettes de 20 m de rayon situées à 200 m et 600 m suivant le transect de 1000 m déjà défini par le CSE, la perpendiculaire passant par le centre de la placette a été tracée à l'aide d'un double penta décimètre (Figure 9). Le choix du nombre de placettes a été fait en tenant compte de la lourdeur du travail à réaliser et du temps imparti pour sa réalisation. Puis, de façon aléatoire, nous avons réalisé 2 prélèvements par profondeur des quatre côtés formés par la perpendiculaire et la ligne du transect à l'aide d'une truelle et d'une tarière. Pour minimiser l'impact du couvert arboré, nous avons choisi les points situés à environ 10 m des arbres. Nous faisons donc le mélange des échantillons prélevés au niveau des deux points de mesure par profondeur et par quadrant.

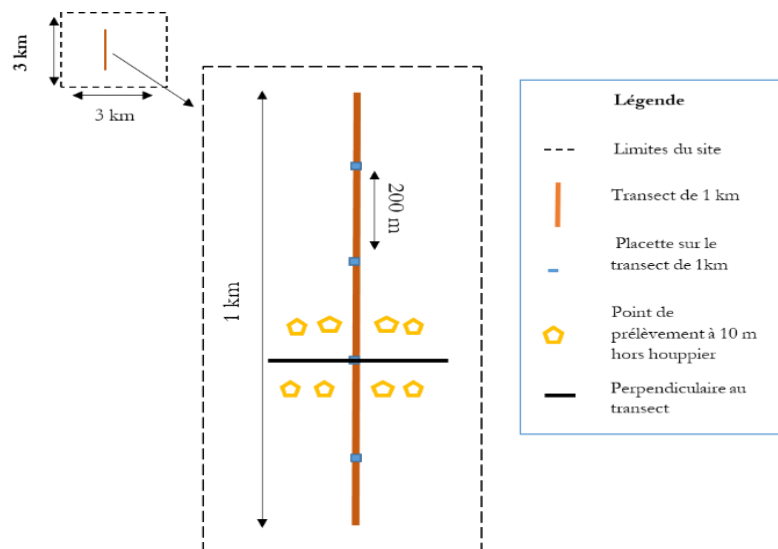


Figure 9. Dispositif de prélèvement des échantillons hors houppier

Ensuite dans chacun des 4 quadrants, nous avons choisi et identifié 4 arbres de hauteur supérieure à 3 m parmi ceux qui sont plus proches du centre de la placette (Figure 10). Chaque arbre a été identifié (nom de l'espèce), localisé (sa distance par rapport au centre du transect) et caractérisé (sa hauteur, ses diamètres croisés de houppier et sa circonférence à 0,30 m du sol ont été mesurés). Sous chaque arbre, nous avons effectué 4 prélèvements dans les quatre directions (Nord, Sud, Est, Ouest) à la distance de $r/2$ (rayon divisé par 2) de la couronne. Ces prélèvements ont été réalisés dans des trous de 15-20 cm de largeur et 30 cm de profondeur à l'aide d'une truelle et d'une tarière.

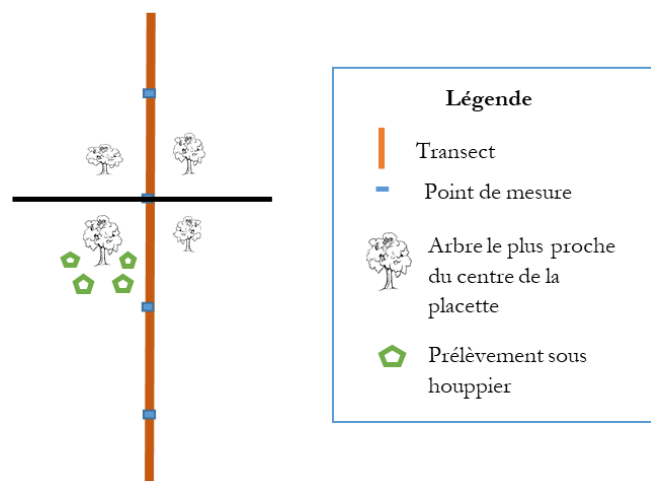


Figure 10. Dispositif de prélèvement des échantillons sous houppier

À l'instar des prélèvements hors houppier, les prélèvements obtenus sous houppiers ont été mélangés dans des bassines pour obtenir un échantillon composite par profondeur et par arbre.

Nous avons ainsi obtenu 480 échantillons dont 32 par site à raison de 16 échantillons sous houppier et 16 hors houppier.

Pour évaluer les stocks de carbone dans le sol, il est nécessaire de tenir compte de la teneur de carbone, et de la densité apparente. Pour la détermination de cette dernière, il a été réalisé des prélèvements de sol sous et hors houppier par profondeur et par site à l'aide d'un cylindre de densité de 100 cm³. Etant donné la friabilité du sol durant la saison sèche, le sol a été humecté avec de l'eau pour faciliter le prélèvement du sol. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'étuve de 105°C pendant 48h avant d'être pesé pour la détermination de leur poids sec à l'aide d'une balance Mettler Toledo de type MS3002S.

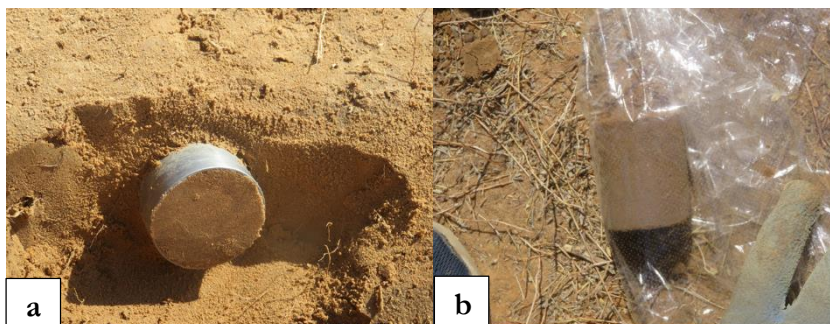


Figure 11. Prélèvement au niveau de l'horizon 0-10 cm (a) de l'échantillon de sol (b) pour la détermination de la Da

2.3. Passage au SPIR et prédiction des teneurs

Avant de passer à l'analyse par la SPIR, les 480 échantillons préalablement séchés à l'air libre, ont été tamisés à l'aide d'un tamis de maille 2 mm. Nous les avons ensuite scannés en utilisant un spectrophotomètre portable de type LabSpec® 4 Standard-Res lab analyzer au LMI IESOL présent sur le campus de Bel Air à Dakar afin d'obtenir les données spectrales de nos échantillons (Figure 12). La réflectance diffuse a été mesurée dans la gamme spectrale de 350 à 2500 nm à 1 nm d'intervalles. Les données spectrales ont été enregistrées sous forme d'absorbance (A) selon l'équation :

Equation 1 : $A = \log 1/R$

où R est la réflectance. Nous avons ensuite effectué les prédictions des teneurs en Carbone et Azote de nos échantillons en nous basant sur le modèle de prédiction des teneurs en C&N des sols développés par Assouma (2016). Ce modèle (N calibration=116, N validation=55, R^2 val=0,89, RPD =2,96) a été établi avec des valeurs de références issues des sols prélevés autour du forage de Widou et du Centre de Recherche Zootechnique (CRZ) de Dahra. Ces échantillons ont été collectés dans les principales unités paysagères d'un territoire pastoral que sont : les parcours, les plantations forestières, les parcelles de mise en défens, les zones autour des campements, les zones à hydromorphie temporaire autour des mares et les aires de repos des animaux autour des forages.



Figure 12. Passage des échantillons au SPIR

2.4. Calcul des stocks de carbone et d'azote organiques

En plus de la teneur en C et de la profondeur, le calcul du stock de carbone doit prendre en compte la densité apparente du sol (D_a). Cela permet de normaliser les effets de différence de gestion des sols sur la masse volumique du sol (VandenBygaart et Angers, 2006). Étant la mesure de la masse du sol par unité de volume, la D_a est calculée à partir de la formule :

$$\text{Equation 2 : } D_a(\text{g/cm}^3) = \frac{m}{v}$$

où m est la masse sèche du sol en g et v le volume du sol équivalent au volume du cylindre en cm^3 .

En nous basant donc sur les teneurs en carbone total (T_c), la densité apparente (D_a) et les données de taux de couverture arboré (T_x) de chaque site, nous avons calculé les stocks de carbone sous et hors houppier, et les stocks globaux de carbone organique par site. Les stocks sous et hors houppier ont été calculés sur la base de la formule développée par Don et *al.* (2007) :

$$\text{Equation 3 : } \text{Stock}(\text{HH ou SH}) = \sum_{i=1}^n D_{a_i} \times T_{c_i} \times P_i$$

où D_{a_i} est la densité apparente par site (g/cm^3), T_{c_i} est la teneur en carbone du sol (mg/g) et P_i la profondeur (cm).

Par ailleurs, nous avons calculé les stocks totaux des sites en rapportant la valeur des stocks sous et hors houppier aux taux de couverture arborée des sites selon la formule :

$$\text{Equation 4 : } \text{Stock}(\text{site}) = T_x \times \text{stock}_{SH} + (1 - T_x) \times \text{stock}_{HH}$$

où, T_x correspond au taux de couverture, stock_{SH} en t/ha au stock sous houppier et stock_{HH} en t/ha au stock hors du couvert arboré.

La même démarche a été adoptée pour le calcul des stocks d'azote sous houppier, hors houppier et les stocks globaux d'azote.

2.5. Analyse chimique des échantillons

Selon la littérature, un modèle d'étalonnage développé sur la base d'échantillons prélevés sur une même zone ne pourra être utilisé que pour prédire d'autres échantillons provenant de cette zone ou des échantillons provenant d'une zone présentant les mêmes propriétés que ceux ayant servi pour l'analyse de référence (Genot et *al.*, 2014). La base de calibration ne couvrant pas tous les types de sols et la diversité des spectres de la zone d'étude, une sélection de 63 échantillons complémentaire parmi ceux prélevés sur le terrain à analyser ayant une signature spectrale différente des données utilisées a été réalisée pour tester la qualité de la calibration et enrichir la base de calibration. Ces échantillons ont été analysés au Laboratoire des Moyens (LAMA) sur le campus de Bel Air à Dakar par combustion avec un analyseur élémentaire (CHN Fisons : Carlo Erba NA) comme décrit par Pansu et Gautheyrou (2007). Cette méthode est basée sur l'élimination des matières organiques présentes dans les échantillons à analyser, grâce à un brûleur atteignant une température de 900°C, accentuée par l'utilisation de nacelles en étain (la température atteint alors 1800°C). La date à laquelle nous avons reçu les résultats et le temps nécessaire pour reprendre la calibration ne nous permettait pas de réaliser ce travail. Cependant, nous avons pu les utiliser pour tester la capacité prédictive du modèle en comparant les valeurs prédites par la première calibration et les mesures de ces échantillons. À terme, les résultats obtenus nous permettront d'étendre la base de calibration du modèle de prédiction obtenu par Assouma (2016) et ainsi d'améliorer sa précision pour l'ensemble notre zone d'étude.

2.6. Analyses statistiques des données

Le traitement des données a consisté à vérifier la significativité statistique des différences observées entre les différents sites pour les teneurs de carbone, d'azote et les stocks de carbone et azote. Le *t* test de Student au seuil de 5% nous a permis de comparer les teneurs observées en fonction des profondeurs, des teneurs sous houppier et hors houppier au niveau de la couche de sol considérée. La détermination des facteurs influençant les teneurs en carbone et azote sous arbre a été effectuée sur la base des tests de Kruskal Wallis au seuil de 5% et de l'option Kruskal MC au seuil de 10%, car les données ne respectaient pas les conditions de normalité des résidus et d'homogénéité de moyenne nécessaires pour la réalisation de tests paramétriques. Les facteurs étudiés sont la circonférence de l'arbre, le diamètre du houppier, la hauteur des arbres et la famille des arbres. L'étude comparative des stocks sous et hors houppier et du stock total par site a été réalisée sur la base d'une analyse en composantes principales (ACP) au seuil de 5% incluant certains facteurs environnementaux présentés dans le tableau 2. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R version 3.4.2. La projection des moyennes de stocks à travers la zone sylvopastorale a été réalisée suivant la méthode des krigeages et à partir du logiciel de cartographie ArcGis version 10.2.2.

Tableau 2. Facteurs environnementaux de l'étude

Code	Type	Unité	Références
Tx couv	Taux de couverture arborée	%	CSE
Biomasse arborée et herbacée	Moyenne (2010-2016)	kg de matière sèche/ha	CSE
Pluviosité	Moyenne (1964-2014)	mm/an	HarvestChoice

Chapitre 3 : Résultats

3.1. Qualité des prédictions

Afin de vérifier la représentativité spectrale des données utilisées pour calibrer le modèle ayant servi à la prédiction des teneurs, nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP). Cette ACP a concerné la base de données de calibration et nos données obtenues après passage des échantillons au SPIR. Les résultats de l'ACP (Figure 13) montrent que nos données s'étendent sur une gamme spectrale plus large que celle de la calibration.

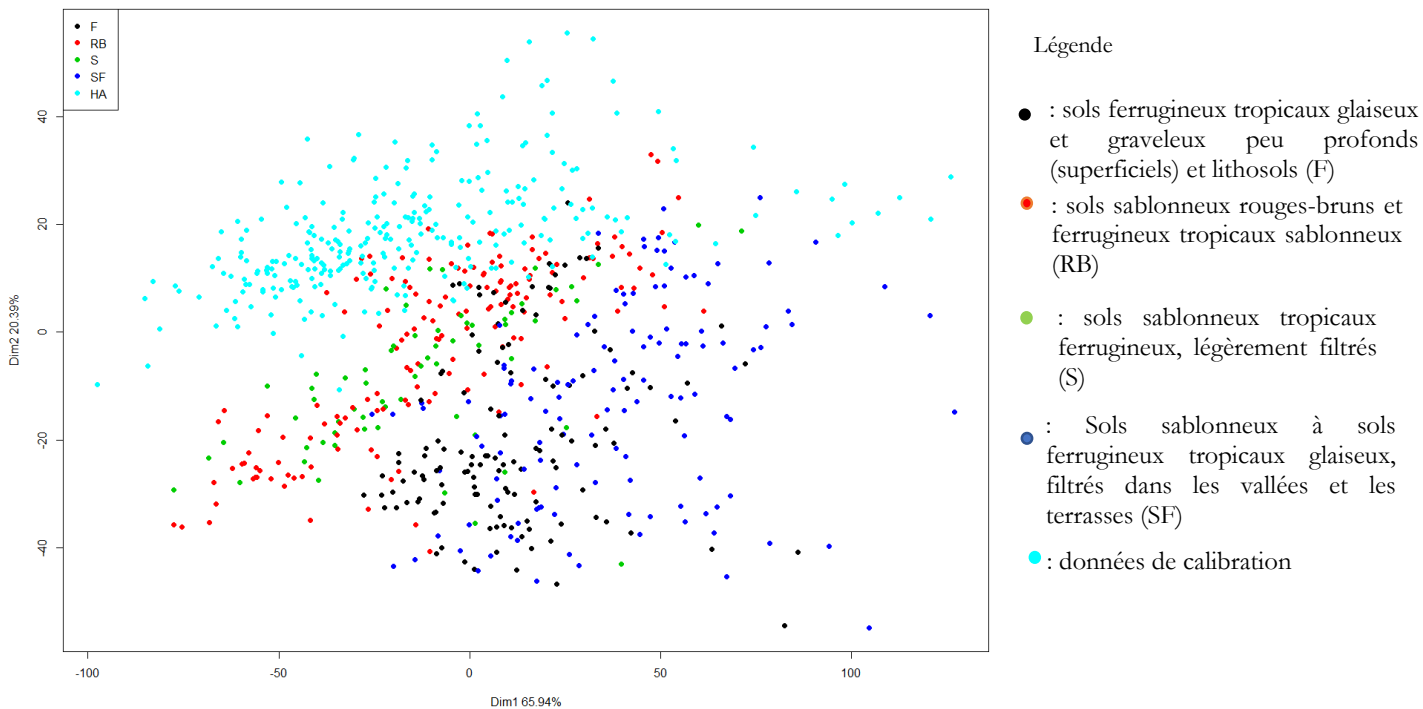


Figure 13. Acp sur les données spectrales en fonction du type de sol

En effet, une bonne part des échantillons se trouve dans des conditions qui ne sont pas optimales pour l'application du modèle de prédiction. La disponibilité des résultats d'analyses réalisées sur 63 des nouveaux échantillons (sélectionnés en-dehors de la zone de recouvrement) nous a cependant permis de tester dans quelle mesure nous pouvions en première approximation utiliser ces données de prédiction, en attendant d'améliorer le modèle. De plus, la visualisation de la relation entre les teneurs obtenues à partir de la prédiction et les résultats du laboratoire montrent que ces données sont prédites avec le bon ordre de grandeur, et que les points se répartissent de manière à peu près équilibrée autour de la droite 1:1 (Figure 14). Cependant on note que les coefficients de corrélation sont assez faibles (0,42 pour l'azote et 0,40 pour le carbone).

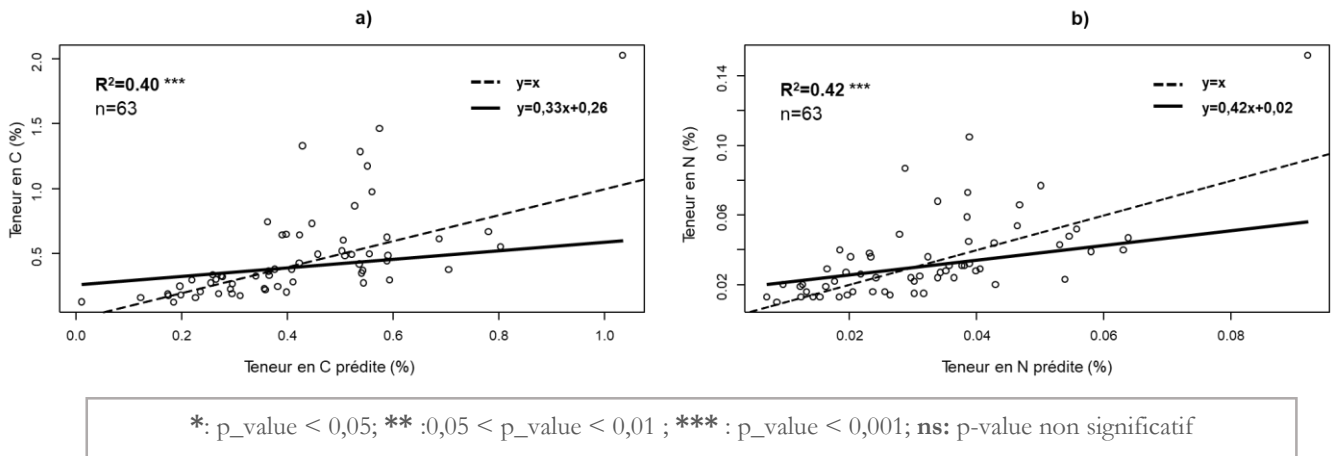


Figure 14. Corrélation entre les résultats de la prédiction et ceux du laboratoire des teneurs en carbone (a) et en azote (b)

3.2. Analyse comparative des teneurs en C, en N et du rapport C/N sous et hors houppier

Les valeurs des teneurs en C et N prédites à partir de l'analyse spectrale sont présentées à l'annexe 1. Les teneurs moyennes ainsi estimées de C sous et hors houppier sont respectivement de $4,52 \text{ mg/g}$ avec un écart type de $0,8$ ($4,52 \pm 0,8 \text{ mg/g}$) et de $3,40 \pm 0,78 \text{ mg/g}$ au niveau de la profondeur 0-10 cm. Au niveau de la profondeur 10-30 cm ces valeurs sont de $3,76 \pm 1,16 \text{ mg/g}$ sous houppier et $3,01 \pm 1,45 \text{ mg/g}$ hors houppier. Pour N la teneur moyenne prédite dans la zone d'étude est de $0,40 \pm 0,11 \text{ mg/g}$ sous houppier et de $0,29 \pm 0,11 \text{ mg/g}$ hors houppier au niveau de la profondeur supérieur (0-10cm). Quant à la profondeur 10-30cm, la teneur est de $0,31 \pm 0,10 \text{ mg/g}$ sous houppier et de $0,28 \pm 0,20 \text{ mg/g}$ hors houppier.

Les diagrammes en boîte à moustaches ont été utilisés pour représenter les teneurs des sols en carbone et en azote selon que le prélèvement a été réalisé sous houppier ou hors houppier (Figure 15). Dans le cas de la teneur du sol en carbone, indépendamment de la profondeur de prélèvement, les valeurs obtenues sont plus élevées dans les sols sous houppier, car l'étendue interquartile varie de 2,5% à 5,7% contre 1,8% à 4% pour les sols hors houppier. Les sols sous houppier ont une meilleure teneur en azote que les sols hors houppier car leur étendue interquartile varie de 0,2% à 0,55% contre 0,1% à 0,35%. Le graphique montre également que les teneurs de N et de C sont significativement plus grandes sous houppier que hors houppier, quelle que soit la profondeur considérée car les p values respectives sont inférieures à 5%. Le rapport C/N permet de juger de l'aptitude de la matière organique à se décomposer plus ou moins rapidement dans le sol. Dans le cas des prélèvements sous houppier, la médiane du rapport C/N se situe autour de 12 avec une étendue interquartile de 9,90 à 13,58 contre 12,5 pour les prélèvements hors houppier avec une étendue interquartile de 9,95 à 16,67. Le rapport C/N des sols hors houppier et sous houppier ne diffère pas significativement au niveau de l'horizon de prélèvement 0-10 cm contrairement à celui des prélèvements à 10-30 cm.

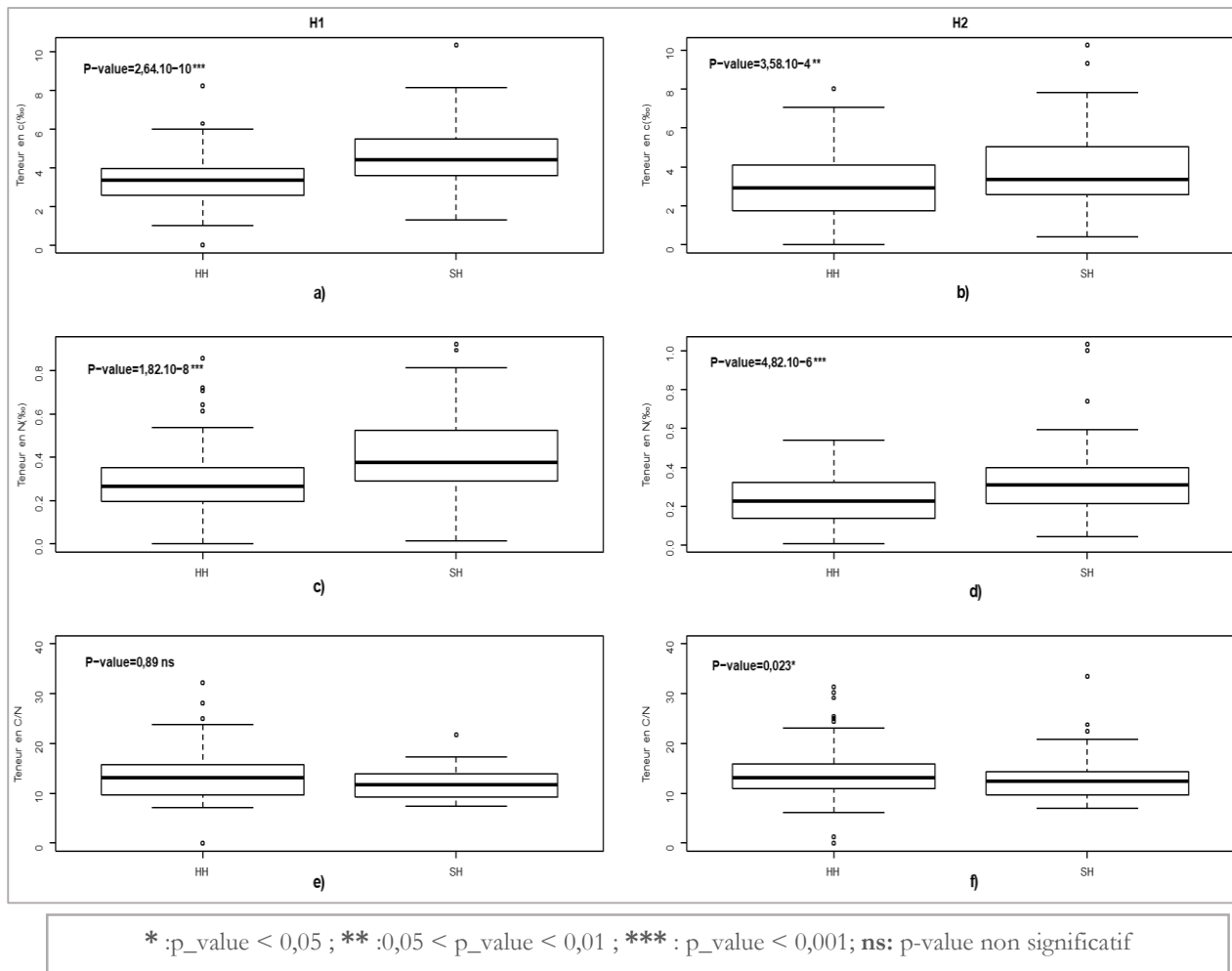


Figure 15. Différence des teneurs en C sous et hors huppier entre 0-10 cm (a) et entre 10-30 cm (b) de profondeur, différence des teneurs en N sous et hors huppier entre 0-10 cm (c) et entre 10-30 cm (d) de profondeur et différence des ratios C/N sous et hors huppier entre 0-10 cm (e) et entre 10-30 cm (f) de profondeur

3.3. Analyse comparative des teneurs en C, en N et du rapport C/N en fonction de la profondeur

Les diagrammes en boîte à moustaches montrent que la teneur en C et en N du sol sous huppier, sont significativement plus grandes au niveau de la profondeur 0-10 cm (figure 16). Il n'y a pas de différence significative observée entre les teneurs en C pour les profondeurs 0-10 cm et 10-30 cm hors huppier. Les teneurs en C hors huppier sont donc constantes, quelle que soit la profondeur considérée par l'étude (0 à 30 cm). Par ailleurs, les teneurs en N sont significativement plus grandes au niveau de la profondeur 0-10 cm qu'au niveau de la profondeur 10-30 cm. En outre, le ratio C/N est plus élevé dans les horizons 10-30 cm ($13,18 \pm 5,18$ hors huppier et $12,20 \pm 2,29$ sous huppier) comparativement aux horizons 0-10 cm ($12,54 \pm 3,24$ hors huppier et $11,60 \pm 2,24$ sous huppier). Cependant la différence entre les ratios C/N n'est significative que hors huppier.

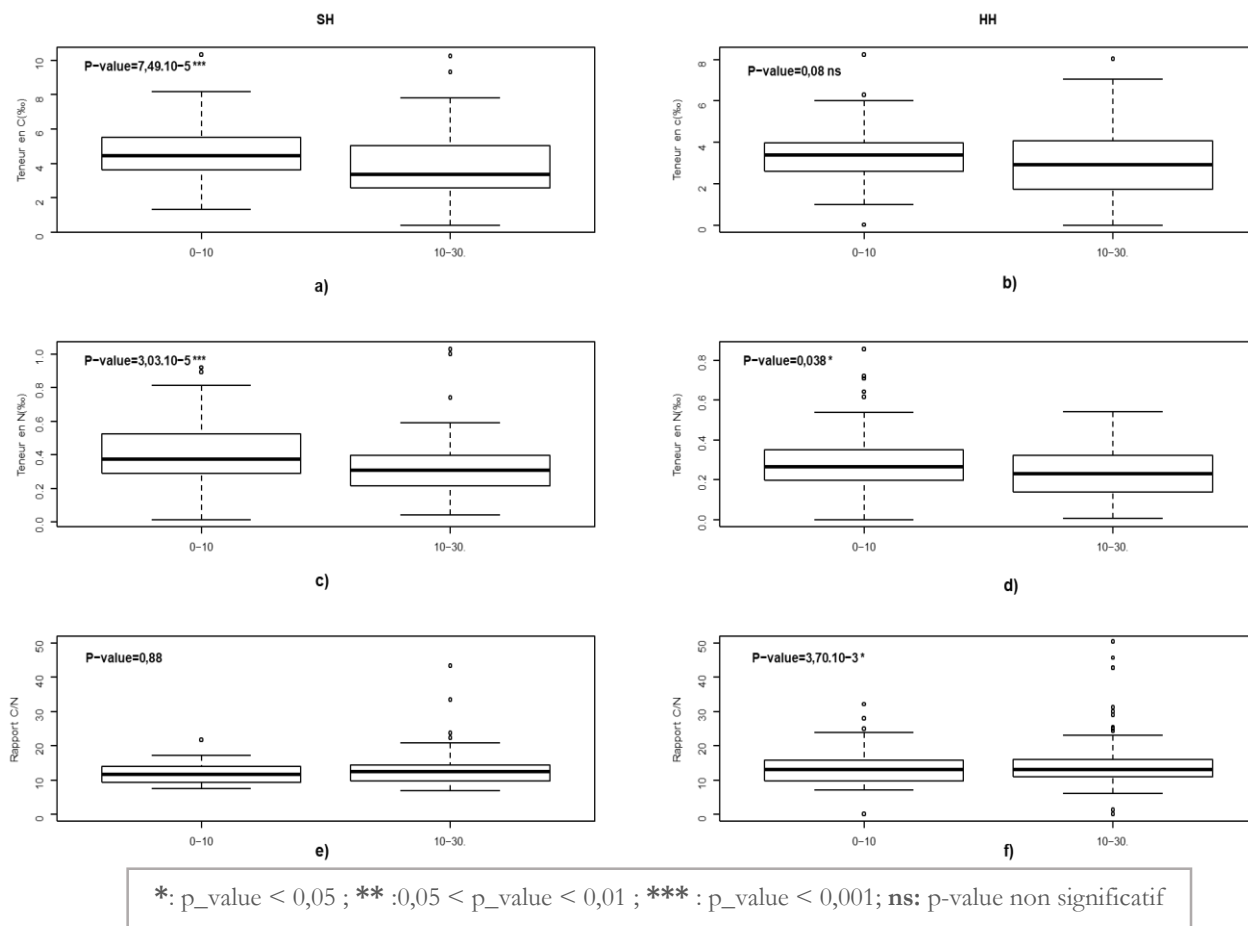


Figure 16. Différence des teneurs en C à 0-10 cm et 10-30 cm de profondeur sous houppier (a) et hors houppier (b), différence des teneurs en N à 0-10 cm et 10-30 cm de profondeur sous houppier (c) et hors houppier (d) Différence des ratios C/N C à 0-10 cm et 10-30 cm de profondeur sous houppier (e) et hors houppier (f)

3.4. Teneurs moyennes sous houppier par arbre

Les espèces rencontrées sur les sites de l'étude sont :

- *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. de la famille des *Capparaceae* ;
- *Combretum glutinosum* Per., *Combretum nigrecans* Lepr., *Guiera senegalensis* J. F. Gmel. de la famille des *Combretaceae* ;
- *Acacia radiana* (Savi) Brenan., *Acacia macrostachya* Reichenb., *Pterocarpus lucens* Guill. & Perr. de la famille des *Fabaceae* ;
- *Grewia bicolor* Juss., *Sterculia setigera* Del., *Bombax constatum* Pellegr. & Vuillet de la famille des *Mahvaceae* ;
- *Ziziphus mauritania* Lam. de la famille des *Rhamnaceae*
- *Balanites aegyptica* (L.) Del. de la famille des *Zygophyllaceae*.

Ne disposant pas d'assez d'individus par espèce pour mener l'analyse, nous nous sommes basé sur les familles pour l'analyse de nos données.

L'analyse comparative des teneurs en C et N indiquent une différence significative entre les prélèvements de sols sous houppier et ceux hors houppier. Aussi, des tests de corrélation entre les teneurs obtenus et des caractéristiques des arbres mesurés sur le terrain ont-ils été réalisés.

Les résultats de ces tests présentés dans le tableau 3 nous montrent qu'il existe une corrélation entre les teneurs en azote obtenues et les caractéristiques d'arbres étudiés (hauteur, circonférence, diamètre de houppier et la famille botanique) au niveau de la profondeur 10-30 cm. Ces teneurs sont significativement corrélées avec la hauteur de l'arbre pour la même profondeur. Au niveau de la profondeur 0-10 cm, les teneurs en azote sont significativement corrélées avec la famille et la hauteur de l'arbre. Cela signifie que tous les paramètres considérés par l'étude peuvent permettre d'expliquer les teneurs en azote observées au niveau de la profondeur 10-30 cm et seulement la famille et la hauteur de l'arbre au niveau de la profondeur 0-10 cm.

Concernant les teneurs en carbone, le seul effet significatif est entre la famille de l'arbre et les teneurs à la profondeur 10-30 cm. La hauteur, la circonférence et le diamètre du houppier de l'arbre ne sont pas corrélés avec les teneurs en carbone. Cela signifie que seule la famille de l'arbre pourrait permettre d'expliquer les différences entre arbres pour les teneurs en carbone observées au niveau de la profondeur 10-30 cm.

Tableau 3. Corrélation entre les caractéristiques de l'arbre et les teneurs sous houppier

Variables	Horizons	Hauteur	Circonférence	Houppier	Famille
C	H1	ns	ns	ns	ns
	H2	ns	ns	ns	0,0082**
N	H1	0,0099**	ns	ns	0,015*
	H2	0,0028***	0,025*	0,046*	0,0046* *

ns : non significatif

Le test ad-hoc du test de Kruskal wallis (kruskalmc) sur la corrélation entre les teneurs en carbone sous houppier de la profondeur 10-30cm et les familles présentées au tableau 4 montre qu'il existe une différence statistique entre les teneurs des familles des *Combretaceae* et *Zygophyllaceae*, des *Fabaceae* et *Zygophyllaceae* et celle des *Malvaceae* et *Zygophyllaceae*.

Tableau 4. Test Kruskalmc sur la teneur en C sous houppier au niveau de la profondeur 10-30 cm

	<i>Capparaceae</i>	<i>Combretaceae</i>	<i>Fabaceae</i>	<i>Malvaceae</i>	<i>Zygophyllaceae</i>
<i>Capparaceae</i>	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Combretaceae</i>	ns	ns	ns	ns	+
<i>Fabaceae</i>	ns	ns	ns	ns	+
<i>Malvaceae</i>	ns	ns	ns	ns	+
<i>Zygophyllaceae</i>	ns	ns	ns	ns	ns

ns : non significatif, **+** :significativement différent

Le test de kruskalmc sur les teneurs en azote au niveau de la profondeur 0-10 cm présenté au tableau 5 montre que les teneurs sous les *Fabaceae* sont statistiquement différentes de celles obtenues sous les *Combretaceae*. Au niveau de la profondeur 10-30cm les teneurs d'azote sous *Combretaceae* sont statistiquement différentes de celle sous les *Capparaceae* et les *Fabaceae* (Tableau 6).

Tableau 5. Test kruskalmc sur la teneur en N sous houppier au niveau de la profondeur 0-10 cm

	<i>Capparaceae</i>	<i>Combretaceae</i>	<i>Fabaceae</i>	<i>Malvaceae</i>	<i>Zygophyllaceae</i>
<i>Capparaceae</i>	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Combretaceae</i>	ns	ns	+	ns	ns
<i>Fabaceae</i>	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Malvaceae</i>	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Zygophyllaceae</i>	ns	ns	ns	ns	ns

ns : non significatif, + :significativement différent

Tableau 6. Test kruskalmc sur la teneur en N sous houppier au niveau de la profondeur 10-30

	<i>Capparaceae</i>	<i>Combretaceae</i>	<i>Fabaceae</i>	<i>Malvaceae</i>	<i>Zygophyllaceae</i>
<i>Capparaceae</i>	ns	+	ns	ns	ns
<i>Combretaceae</i>	ns	ns	+	ns	ns
<i>Fabaceae</i>	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Malvaceae</i>	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Zygophyllaceae</i>	ns	ns	ns	ns	ns

ns : non significatif, + :significativement différent

3.5. Relation entre les stocks et les facteurs environnementaux

Les valeurs des teneurs en C et N prédites présentées à l'annexe 1, combinées aux mesures de densités apparentes nous permettent de calculer des stocks par unité de surface (annexe 2). Les stocks moyens de C sous houppier, hors houppier et totaux sont respectivement de $22,05 \pm 5,19$ t/ha, de $17,55 \pm 78$ t/ha ; et de $18,51 \pm 6,02$ t/ha. Au niveau de N ces valeurs sont de $1,88 \pm 0,55$ t/ha sous houppier, $1,42 \pm 0,54$ t/ha hors houppier et de $1,52 \pm 0,52$ t/ha au total. Les stocks de C et de N calculés seraient donc plus élevés sous houppier que hors houppier.

L'ACP entre les stocks et les facteurs environnementaux représenté par la figure 17 montre certaines spécificités en fonction de l'élément considéré. En tenant compte des coefficients de corrélation présentée au tableau 7, nous pouvons dire que les stocks de C hors houppier et les stocks de C totaux sont significativement corrélés avec la latitude, la longitude, le taux de couverture, la biomasse et la pluviométrie. Les stocks de C sous houppier ne sont significativement corrélés qu'avec la longitude. Les stocks d'azote hors houppier et les stocks d'azote totaux ne présentent pas de corrélation significative

avec les facteurs considérés. Tandis que le stock d'azote sous houppier présente une corrélation significative avec le type de sol.

Par ailleurs les rapports des stocks de C sur les stocks de N hors houppier, sous houppier et totaux semblent être fortement corrélés avec la pluviométrie et la biomasse du sol. De plus, le taux de couvertures des arbres semble évoluer suivant un gradient Est-Ouest. Plus l'on se rapproche de l'Ouest, le taux de couverture des arbres augmente. Aussi, la biomasse et la pluviométrie semblent évoluer suivant un gradient Nord-Sud ; la pluviométrie augmente donc lorsque nous nous rapprochons du sud. L'analyse de la corrélation au niveau des stocks de C et des stocks de N à partir de la projection des moyennes obtenues montre qu'il existe des gradients d'évolution des stocks à travers la zone sylvo pastorale. Ainsi, le Stock de C évolue selon un gradient Nord –Sud (Figure 18). Le stock de N évolue selon un gradient Ouest-Est (Figure 19). Le rapport, des stocks de C sur les stocks de N totaux évolue suivant un gradient Nord-Sud et un gradient Est-Ouest (Figure 20).

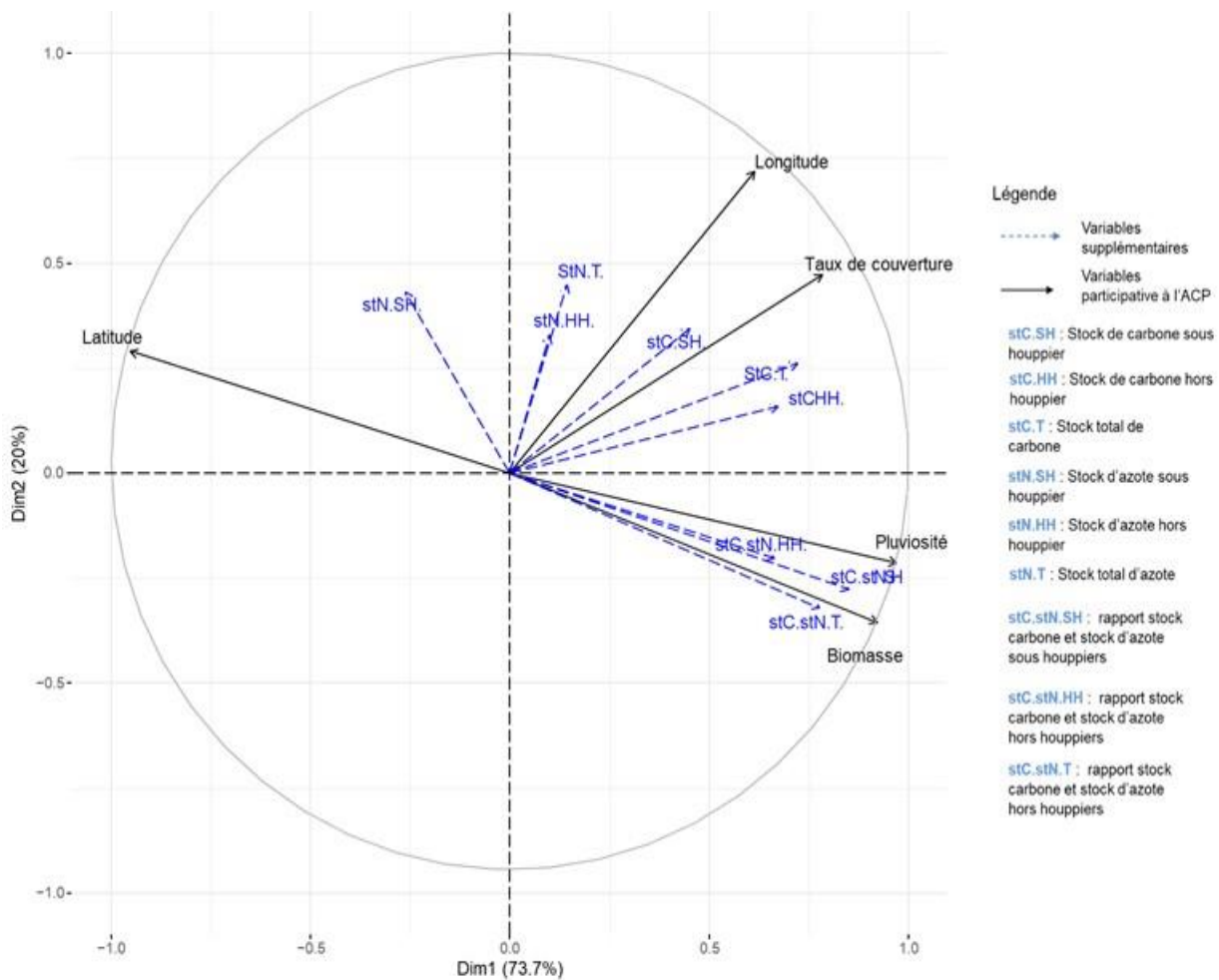


Figure 17. Acp sur les données de stock et les facteurs environnementaux

Tableau 7. Coefficients de corrélations entre les stocks et facteurs environnementaux

Facteurs	StockC			StockN			stockC/stockN		
	HH	SH	Totaux	HH	SH	Totaux	HH	SH	Totaux
Longitude	0,31*	0,39*	0,44*	0,14	0,06	0,22	0,03	0,11	0,05
Lattitude	0,36*	0,11	0,38*	0,00	0,14	0,00	0,48	0,80	0,70
Tx.de.couverture	0,32*	0,15	0,42*	0,02	0,01	0,06	0,26	0,28	0,24
Biomasse	0,31*	0,12	0,33*	0,00	0,12	0,00	0,41*	0,78	0,65
Pluviométrie	0,39*	0,12	0,41*	0,00	0,13	0,00	0,50*	0,77	0,69
Types.de.sol	0,48	0,40	0,54	0,15	0,32*	0,15	0,61	0,70	0,68

* : R² significatif selon les p_value à l'annexe 4

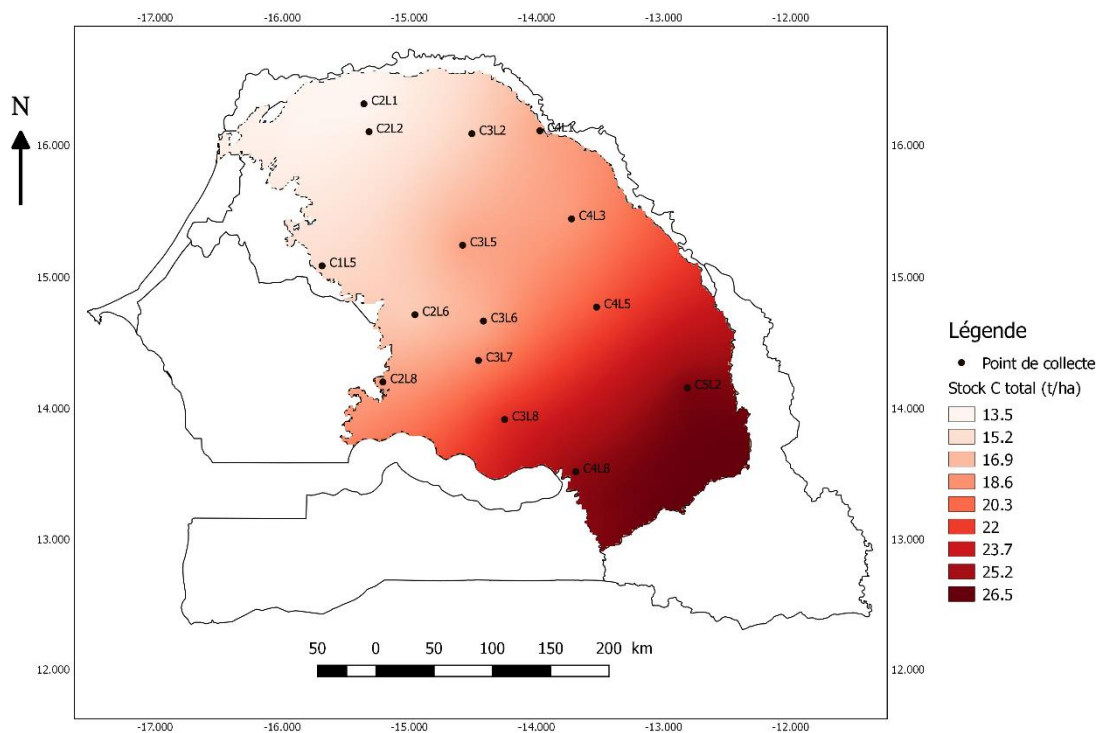


Figure 18. Interpolation des stocks totaux de C uniquement avec les coordonnées spatiales des sites à travers la zone sylvopastorale du Sénégal

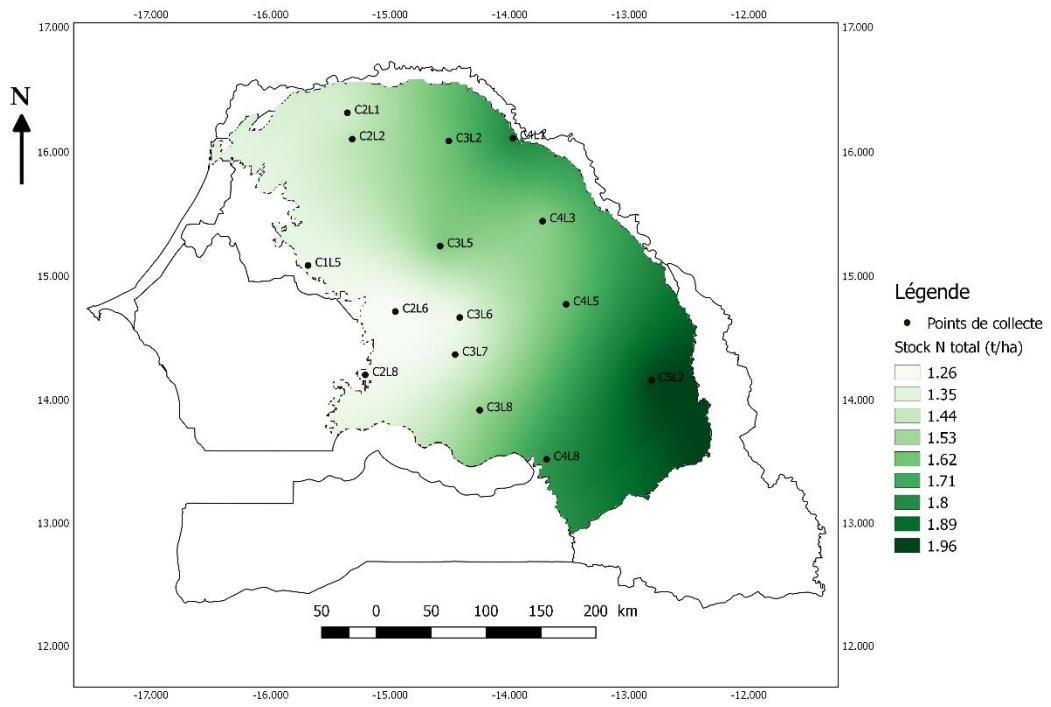


Figure 19. Interpolation des stocks totaux de N uniquement avec les coordonnées spatiales des sites à travers la zone sylvo pastorale du Sénégal

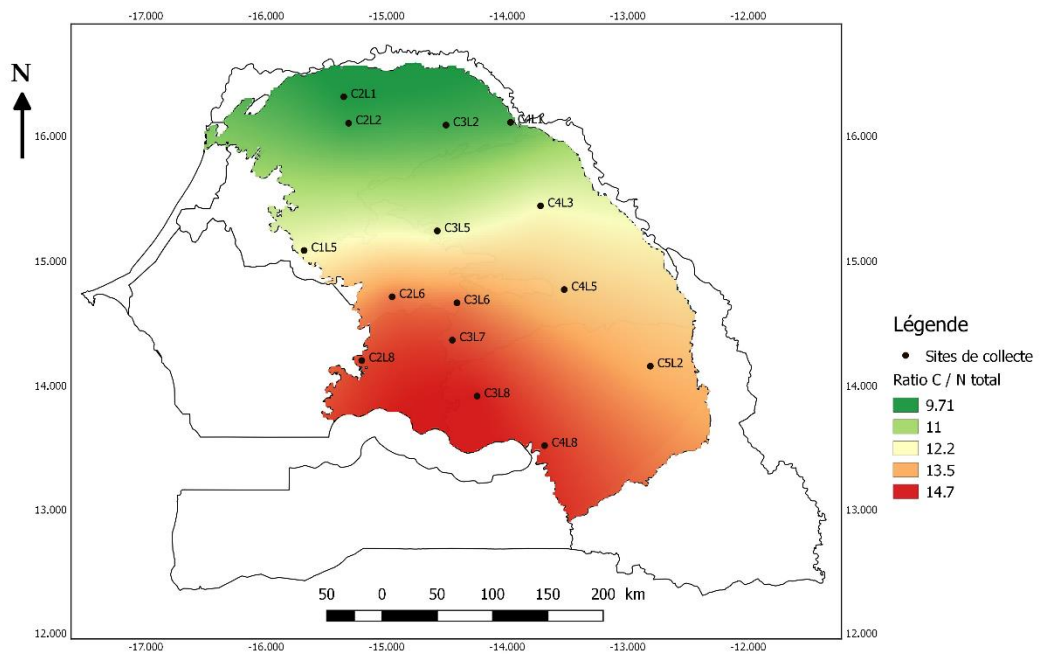


Figure 20. Interpolation du rapport Stock C sur stock N totaux uniquement avec les coordonnées spatiales des sites à travers la zone sylvo pastorale du Sénégal

Chapitre 4 : Discussion

4.1. Qualité des prédictions

L'analyse en composante principale entre les données de calibration du modèle et les données spectrales de l'étude montre une répartition spectrale plus large de nos données par rapport aux données de calibration du modèle en raison des différences entre les échantillons de l'étude et ceux de la base de calibration. En effet, les échantillons ayant servi à la conception du modèle ont essentiellement été prélevés sur des sols sableux, tandis que nos données ont été prélevées sur des sols ferrugineux tropicaux, des sols sablonneux tropicaux ferrugineux, et des sols sablonneux Rouge-bruns. Il faudrait donc reprendre une nouvelle calibration pour améliorer les prédictions de teneurs et les résultats de stocks de nos sites. En outre, les tests de corrélation entre la prédiction et les résultats du laboratoire montrent que la prédiction présente des valeurs cohérentes qui sont cependant dispersées. Les teneurs prédites sont toutefois correctes en termes de grandeur. Ainsi, dans la mesure où les ordres de grandeur restent cohérents, nous avons choisi d'appliquer le modèle disponible en l'état afin d'avoir une première estimation de la répartition de nos valeurs estimées.

4.2. Influence des arbres sur les teneurs

Les tests de comparaison montrent que les teneurs en C et en N sont plus élevées sous houppier que hors houppier. Cet écart est plus prononcé au niveau de l'horizon de surface (0-10cm). Cela révèle une influence positive de la présence des arbres sur le sol, qui se traduirait par l'augmentation des teneurs en carbone et azote sous houppier surtout au niveau de l'horizon supérieur du sol. Ce constat a également été fait dans la zone sylvopastorale du Ferlo au Nord du Sénégal par Akpo et *al.* (2005). De plus, l'étude du rapport C/N montre que l'activité biologique est plus élevée sous houppier et, qu'elle est plus importante au niveau de l'horizon de surface (0-10cm). L'arbre favorise donc une augmentation de la production de matière organique et sa décomposition en éléments minéraux stables contenus dans l'humus (humification). En effet, par la production de litière et de rhizodépôts, l'arbre induit une forte concentration en matière organique (MO) sous houppier qu'en dehors (Belsky et *al.*, 1989; Claude et *al.*, 1991). Cependant, cette augmentation peut aussi être liée aux apports de fèces d'animaux (avifaune, et ruminants) sous les arbres lorsqu'ils s'y installent pour bénéficier de l'ombre. Celle-ci peut également être liée à une augmentation de la biomasse microbienne sous les arbres par rapport au biotope hors couvert (Diallo et *al.*, 2017). Par ailleurs les différences observées sous et hors houppier au niveau des teneurs en azote sont inférieures à celle observée par Akpo (1992) et Grouzis et Akpo (1998). En effet, dans leur étude, la teneur sous houppier était 2 fois supérieure à celle hors houppier pour l'horizon de surface. Tandis que le facteur de multiplication est 1,04 dans notre étude. Cette différence peut s'expliquer par la distinction entre les zones considérées par chaque étude. Nos résultats sont une moyenne des teneurs à

l'échelle de toute la zone sylvopastorale, tandis que ceux de Grouzis et Apko (1998) ne concernent que la zone Nord sylvopastorale (Ferlo).

4.3. Corrélation entre les teneurs sous houppier et les caractéristiques des arbres.

L'analyse de la corrélation entre les teneurs sous houppier et les caractéristiques mesurées sur les arbres (hauteur, circonférence, diamètre de houppier moyen et famille) présente des différences selon la profondeur considérée.

Au niveau de l'horizon 0-10cm, la teneur en C ne présente pas de corrélation avec tous les facteurs considérés. Alors que la teneur en N présente au moins une corrélation avec la hauteur de l'arbre. Cependant au niveau de l'horizon 10-30cm, la teneur en N est corrélée avec tous les facteurs alors que le C ne l'est qu'avec la famille de l'arbre.

La famille pourrait donc être un facteur de variation des teneurs en C dans le sol au niveau de l'horizon secondaire (10-30cm). Par ailleurs, la famille et la hauteur des arbres peuvent expliquer les variations des teneurs en N sous arbre. Ces résultats, peuvent s'expliquer par la différence intra et inter famille observée entre les familles considérées. En effet la production fourragère diffère entre ces familles selon Houérou (1980) dans son étude sur l'état des fourrages en Afrique. Ce qui sous-entend que la production de litière diffère entre ces familles. En plus, les spécificités racinaires (production de radicelles et profondeur), la différence d'âge des espèces représentatives des familles pourraient expliquer les distinctions observées entre les familles d'arbres. Par ailleurs, les différences observées peuvent également être attribuées à la capacité de certaines espèces à réaliser des symbioses avec les microorganismes du sol. C'est le cas des *Fabaceae* (légumineuses) qui à partir d'une symbiose racinaire avec les bactéries noduleuses augmente la disponibilité de l'azote dans le sol.

4.4. Variation des stocks en fonction des facteurs environnementaux

De façon générale, les stocks de C et de N par unité de surface sont toujours plus élevés sous houppier que hors houppier. Ce résultat est corrélé avec les différences des teneurs de C et N sous et hors houppier.

En outre, la valeur de stock de C total observée est inférieure à celle trouvée par (Woomer et *al.*, 2004) (18,51 t/ha contre 20,6 t/ha). Elle peut s'expliquer par la différence entre les profondeurs de prélèvements de sol entre ces deux études (40cm de profondeur dans l'étude de Woomer contre 30cm dans cette étude). Ils sont par ailleurs plus élevés que ceux obtenus dans la zone de parcours désertiques et buissonnantes (18,51 t/ha contre 15,45 t/ha) selon la classification de Henry et *al.* (2009).

De plus, l'analyse de l'ACP entre les stocks et les facteurs environnementaux montre que la distribution des stocks de C dans la zone pastorale évolue avec le taux de couverture, la biomasse arborée et la pluviosité, suivant un gradient Nord-Sud. La pluviosité et la biomasse évoluent par ailleurs suivant ce même gradient. Ainsi, le stock de C croît avec l'augmentation de la densité des arbres et l'augmentation de la pluviosité. Ce qui concorde avec les résultats des études qui ont montré que la matière organique

du sol auquel est lié le stock de C du sol en prairie est majoritairement liée à la production de litière et aux dépôts racinaires de la végétation. Ce résultat est corroboré par l'étude de Penning de Vries et Djitèye (1982) sur l'évaluation de la productivité des pâturages sahéliens et celle de Hiernaux et *al.* (1994). En effet, les premiers auteurs ont montré que la pluviosité est un facteur déterminant de la production végétale des pâturages en zone sahélienne (Penning de Vries et Djitèye, 1982). Dans leur étude sur la fluctuation saisonnière de la feuillaison des arbres et des buissons sahéliens, Hiernaux et *al.* (1994) ont montré que l'effet saisonnier de la densité maximale de feuillaison des ligneux d'une année dépend avant tout des infiltrations hydriques accumulées dans le sol au cours de l'année précédente.

Le rapport des stocks de C sur les stocks de N totaux évolue suivant les gradients Nord-Sud et Est-Ouest. Ce qui confirme les résultats ressortant de l'ACP. En effet, ce rapport présente une corrélation avec la biomasse et la pluviométrie. De plus, il évolue suivant le gradient du taux de couverture. L'évolution du couvert végétal et de la pluviosité peuvent donc être des facteurs influençant le rapport étudié.

Conclusion et perspectives

L'étude de l'influence des arbres sur les teneurs et stocks de C et de N a montré que les arbres permettent une amélioration des propriétés chimiques du sol, de son activité biologique et le stockage du carbone. Cette amélioration se fait surtout au niveau de la couche superficielle du sol et est influencée par les fluctuations saisonnières de la feuillaison des et de la pluviosité.

Les arbres favorisent donc la fertilité des sols, le stockage du C dans les sols en zone sylvopastorale sahélienne et contribue ainsi à l'atténuation des changements climatiques.

Ces résultats corroborent le constat fait par Assouma (2016). En effet, ceux-ci ont démontré que le bilan de C est en équilibre dans la zone de Widou au Nord de la zone sylvopastorale du Sénégal grâce à une compensation des émissions totales des GES liés à l'activité d'élevage par l'accumulation du carbone dans le sol et les arbres à l'échelle du territoire pastoral. Cependant, cette zone est considérée comme celle qui a le plus faible stock de toute la zone pastorale. Nous pouvons donc supposer que les zones avec les stocks de C les plus élevés présenteraient un bilan C négatif ; ces zones favoriseraient donc le stockage de C dans le sol et les plantes plus élevé.

Les recommandations opératoires à l'endroit du CSE découlant de cette étude sont les suivantes :

- affiner le modèle de calibration en enrichissant la base de calibration avec les résultats des analyses de laboratoire sur les 63 échantillons ;
- augmenter le nombre de placettes pour une meilleure précision ;
- faire un profil pédologique et une analyse de sol de chaque site pour déterminer les différents horizons, la texture et la structure du sol afin d'améliorer la précision de l'analyse.

Par ailleurs, les perspectives de recherche découlant de cette étude sont :

- répéter les mesures en saison pluvieuse afin d'évaluer les fluctuations saisonnières et de déterminer l'influence des arbres à l'échelle annuelle ;
- réaliser l'étude en fonction du microrelief pour étudier l'impact des arbres en fonction de la topographie ;
- évaluer l'apport des animaux pour mieux identifier l'impact des arbres ;
- reprendre les mesures dans les prochaines années (après 5 ans au moins) afin de déterminer la dynamique d'évolution des teneurs et stocks en C, en N des sols en fonction de la dynamique de végétation en zone sylvopastorale ;
- réaliser le bilan de C à travers la zone pastorale du Sénégal.

Références bibliographiques

- Aita, C., 1996. Couplage des cycles du carbone et de l'azote dans les sols cultivés : étude, au champ, des processus de décomposition après apport de matière organique fraîche. Paris 6.
- Akpo, L.-E., 1992. Influence du couvert ligneux sur la structure et le fonctionnement de la strate herbacée en milieu sahélien: les déterminants écologiques.
- Akpo, L.E., Banoïn, M., Grouzis, M., 2003. Effet de l'arbre sur la production et la qualité fourragères de la végétation herbacée: bilan pastoral en milieu sahélien. *Rev. Médecine Vét.* 154, 619–628.
- Akpo, L.E., Goudiaby, V.A., Grouzis, M., Le Houerou, H.N., 2005. Tree shade effects on soils and environmental factors in a savanna of Senegal. *West Afr. J. Appl. Ecol.* 7, 12.
- Akpo, L.E., Grouzis, M., 2000. Valeur pastorale des herbages en région soudanienne, le cas des parcours sahéliens du Nord-Sénégal. *Tropicultura* 18, 1–8.
- Andrianarisoa, K.S., 2009. Minéralisation de l'azote et nitrification dans les écosystèmes forestiers : effet du type de sol et de l'essence forestière 279.
- Assouma, M.A., 2016. Approche écosystémique du bilan des gaz à effet de serre d'un territoire sylvo-pastoral sahélien: contribution de l'élevage. *Octoral Thesis Paris AgroParisTech* 230.
- Assouma, M.H., Vayssières, J., Bernoux, M., Hiernaux, P., Lecomte, P., 2014. Greenhouse gas balance of a tropical sylvo-pastoral ecosystem in Senegal's semi-arid Region, in: *Livestock, Climate Change and Food Security Conference*. pp. 19–20.
- Bationo, B.A., Ouedraogo, S.J., Somé, A.N., Pallo, F., Boussim, I.J., 2005. Régénération naturelle d'*Isobertia doka* Craib. et Stapf. dans la forêt classée du Nazinon (Burkina Faso). *Cah. Agric.* 14, 297-304 (1).
- Belsky, A.J., Amundson, R.G., Duxbury, J.M., Riha, S.J., Ali, A.R., Mwonga, S.M., 1989. The effects of trees on their physical, chemical and biological environments in a semi-arid savanna in Kenya. *J. Appl. Ecol.* 1005–1024.
- Bernoux, M., Chevallier, T., Cornet, A., collab., 2013. Le carbone dans les sols des zones sèches : des fonctions multiples indispensables 44.
- Besse, F., Harmand, J.-M., Mallet, B. et al, 1998. L'arbre et les formations arborées éléments moteurs du développement rural?
- Blanfort, V., Ponchant, L., Dezecache, C., Freycon, V., Picon-Cochard, C., Blanc, L., Fontaine, S., Stahl, C., 2013. Dynamique du carbone dans les sols de prairies issues de la déforestation de la forêt guyanaise 42–45.
- Blanfort, V., Stahl, C., 2013. Actes du séminaire «Le Carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives». *Cayenne Guyane Fr.* 1, 5.
- Butterbach-Bahl, K., Gundersen, P., Ambus, P., Augustin, J., Beier, C., Boeckx, P., Dannenmann, M., Sanchez Gimeno, B., Ibrom, A., Kiese, R., 2011. Nitrogen processes in terrestrial ecosystems, in:

The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press, pp. 99–125.

Clark, P.J., Evans, F.C., 1954. Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations. *Ecology* 35, 445–453.

Claude, J., Grouzis, M., Milleville, P., 1991. Un espace sahélien: la mare d'Oursi, Burkina Faso. IRD Editions.

De Mazancourt, C., Loreau, M., Abbadie, L., 1998. Grazing optimization and nutrient cycling: when do herbivores enhance plant production? *Ecology* 79, 2242–2252.

Diallo, M.D., Goalbaye, T., Mahamat-Saleh, M., Sarr, P.S., Masse, D., Wood, S.A., Diop, L., Dick, R.P., Diop, A., Guisse, A., 2017. Effects of major woody species of the Senegalese Great Green Wall on N mineralization and microbial biomass in soils= Effets des principales essences de la grande muraille verte sénégalaise sur les taux d'azote minéral du sol et la biomasse microbienne. *Bois Forets Trop.* 43–54.

Diop, A.T., 2007. Dynamique écologique et évolution des pratiques dans la zone sylvopastorale du Sénégal: perspectives pour un développement durable. *Fac. Sci. Econ. Gest. FASEG* 296.

Djoudi, H., Brockhaus, M., Locatelli, B., 2013. Once there was a lake: vulnerability to environmental changes in northern Mali. *Reg. Environ. Change* 13, 493–508.

Don, A., Schumacher, J., Scherer-Lorenzen, M., Scholten, T., Schulze, E.-D., 2007. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites—implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma* 141, 272–282.

Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., 2014. IPCC, 2014: summary for policymakers. *Clim. Change* 33.

Feller, C., Blanchart, E., Bernoux, M., Lal, R., Manlay, R., 2012. Soil fertility concepts over the past two centuries: the importance attributed to soil organic matter in developed and developing countries. *Arch. Agron. Soil Sci.* 58, S3–S21.

Freibauer, A., Rounsevell, M.D., Smith, P., Verhagen, J., 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122, 1–23.

Genot, V., Bock, L., Dardenne, P., Colinet, G., 2014. L'intérêt de la spectroscopie proche infrarouge en analyse de terre (synthèse bibliographique). *Biotechnol Agron Soc Env.* 15.

Gerber, P., Touré, I., Ickowicz, A., Garba, I., Toutain, B., 2012. Quels enjeux pour un système d'information sur le pastoralisme au Sahel? 36.

Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., Tempio, G., 2013. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Gill, S.E., Handley, J.F., Ennos, A.R., Pauleit, S., 2007. Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Clim. Change Cities* 33, 19.

- Gning, M.C., 2003. The Political Economy of Livestock in Senegal. -Poor Livest. Policy Facil. FAO Inst. Int. Stud. Berkeley 44.
- Grouzis, M., Akpo, E., 1998. Dynamique des interactions arbre-herbe en milieu sahélien: influence de l'arbre sur la structure et le fonctionnement de la strate herbacée 41–42.
- Guesnerie, R., 2003. Kyoto et l'économie de l'effet de serre. La documentation française.
- Hatfield, R., Davies, J., 2006. Global review of the economics of pastoralism 47.
- Henry, M., Valentini, R., Bernoux, M., 2009. Soil carbon stocks in ecoregions of Africa. Biogeosciences Discuss. 797–823.
- Herz, R.K., 1988. Considering climatic factors for urban land use planning in the Sahelian zone. Energy Build. 91–101.
- Hiernaux, P.H.Y., Cissé, M.I., Diarra, L., De Leeuw, P.N., 1994. Fluctuations saisonnières de la feuillaison des arbres et des buissons sahéliens. Conséquences pour la quantification des ressources fourragères. Rev. D'Élevage Médecine Vét. Pays Trop. 47, 117–125.
- Houérou, H.N., 1980. Les fourrages ligneux en Afrique: Etat actuel des connaissances, in: Colloque, Addis Abeba. p. 481.
- Lecomte, P., Blanfort, V., 2013. Elevage, gaz à effet de serre et changements d'utilisation du territoire 18–21.
- Lessard, G., Boulfroy, E., 2008. Les rôles de l'arbre en ville 21.
- Menaut, J.C., Barbault, R., Lavelle, P., Lepage, M., 1985. African savannas: Biological systems of humification and mineralization. 14–33.
- Moureaux, C., 1967. Influence de la température et de l'humidité sur les activités biologiques de quelques sols ouest-africains. Cah ORSTOM Sér Pédol 5, 393–420.
- Ndiaye, O., Diop, A., Akpo, L., Diene, M., 2015. Dynamique de la teneur en carbone et en azote des sols dans les systèmes d'exploitation du Ferlo : cas du CRZ de Dahra. J. Appl. Biosci. 83, 7554.
- Ngom, D., Fall, T., Sarr, O., Diatta, S., Akpo, L.E., 2013. Caractéristiques écologiques du peuplement ligneux de la réserve de biosphère du Ferlo (Nord Sénégal). J. Appl. Biosci. 65.
- Noble, I., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo, D.J., Dokken, D.J., 2000. Land use, land use change, and forestry. Cambridge University Press.
- O'rourke, S.M., Holden, N.M., 2011. Optical sensing and chemometric analysis of soil organic carbon—a cost effective alternative to conventional laboratory methods? Soil Use Manag. 27, 143–155.
- Paavola, J., 2008. Livelihoods, vulnerability and adaptation to climate change in Morogoro, Tanzania. Environ. Sci. Policy 642-654.
- Pansu, M., Gautheyrou, J., 2007. Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods. Springer Science & Business Media.

- Penning de Vries, F.W.T., Djitèye, M.A., 1982. La productivité des pâturages Sahéliens: une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle 24.
- Poupon, H., 2013. Dans les écosystèmes sahéliens. FAO 1.
- Powlson, D.S., Whitmore, A.P., Goulding, K.W.T., 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *Eur. J. Soil Sci.* 62, 42–55.
- Pramova, E., Locatelli, B., Djoudi, H., Somorin, O.A., 2012. Le rôle des forêts et des arbres dans l'adaptation sociale à la variabilité et au changement climatiques. Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Soltner, D., 2000. Les Bases de la Production Végétale, T1: le Sol et son Amélioration, 22nd ed. Sciences et Techniques Agricoles "Le clos Lorelle," 49130 Saint-Gemmes-Sur-Loire.
- Soussana, J.-F., Tallec, T., Blanfort, V., 2010. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal* 4, 334–350.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Haan, C., 2009. L'ombre portée de l'élevage 27.
- Sun, Z., Zhang, Y., Li, J., Zhou, W., 2014. Spectroscopic Determination of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Content in Pasture Soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 45, 1037–1048.
- Tappan, G., Sall, M., Wood, E., Cushing, M., 2004. Ecoregions and land cover trends in Senegal. *J. Arid Environ.* 59, 427–462.
- Tougiani, A., Guero, C., Rinaudo, T., 2009. Community mobilisation for improved livelihoods through tree crop management in Niger. *GeoJournal* 74, 377–389.
- VandenBygaart, A.J., Angers, D.A., 2006. Towards accurate measurements of soil organic carbon stock change in agroecosystems. *Can. J. Soil Sci.* 86, 465–471.
- Verchot, L.V., Van Noordwijk, M., Kandji, S., Tomich, T., Ong, C., Albrecht, A., Mackensen, J., Bantilan, C., Anupama, K.V., Palm, C., 2007. Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 12, 901–918.
- Watson, R.T., Noble, I.R., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo, D.J., Dokken, D.J., 2000. Land use, land-use change and forestry. A special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Camb. Camb. Univ.* 21.
- Woomer, P., Touré, A., Sall, M., 2004. Carbon stocks in Senegal's Sahel Transition Zone. *J. Arid Environ.* 59, 499–510.

Annexes

Annexe 1 . Teneur moyenne en carbone et azote par site

Site	Trait	C (mg/g)				N(mg/g)				C/N			
		H1		H2		H1		H2		H1		H2	
		M	sd	M	sd	M	sd	m	sd	m	sd	m	sd
C1L5	HH	3,04	0,51	2,35	0,70	0,28	0,05	0,19	0,08	10,70	1,11	12,26	2,30
	SH	4,08	0,85	3,13	1,23	0,38	0,09	0,27	0,13	10,82	1,10	11,41	1,85
C2L1	HH	2,74	1,76	1,16	1,15	0,31	0,17	0,13	0,12	8,79	2,61	9,00	5,83
	SH	3,42	1,38	1,97	1,07	0,36	0,15	0,21	0,14	9,64	1,31	9,34	2,78
C2L2	HH	4,72	1,71	1,48	0,47	0,50	0,18	0,18	0,08	9,38	0,65	8,28	3,98
	SH	4,65	2,15	4,11	3,54	0,50	0,25	0,45	0,36	9,37	1,75	9,16	1,13
C2L6	HH	2,13	0,41	1,54	0,58	0,13	0,05	0,08	0,07	16,02	4,89	20,55	29,28
	SH	3,43	0,75	2,59	0,56	0,25	0,09	0,21	0,10	13,65	3,44	12,43	4,68
C2L8	HH	3,76	0,80	3,07	0,52	0,24	0,07	0,21	0,04	15,43	1,62	14,80	2,97
	SH	4,64	0,85	3,27	0,64	0,31	0,06	0,22	0,05	15,18	1,07	14,66	4,10
C3L2	HH	3,51	0,68	1,80	0,17	0,41	0,09	0,90	0,10	8,55	0,46	1,99	4,84
	SH	5,22	0,89	3,90	1,07	0,59	0,09	0,41	0,12	8,87	0,30	9,50	0,84
C3L5	HH	3,26	1,24	4,04	1,10	0,37	0,16	0,36	0,09	8,80	1,10	11,36	2,58
	SH	4,38	0,82	3,75	0,65	0,51	0,11	0,39	0,08	8,62	0,44	9,61	0,51
C3L6	HH	2,76	0,77	1,53	0,42	0,17	0,09	0,09	0,05	16,33	7,15	16,82	36,49
	SH	4,09	1,35	3,20	2,13	0,30	0,17	0,21	0,16	13,49	45,09	14,97	12,22
C3L7	HH	3,36	0,46	3,19	0,69	0,21	0,03	0,23	0,05	16,39	1,40	13,87	1,15
	SH	4,19	0,56	2,79	0,51	0,30	0,04	0,20	0,04	14,01	0,57	14,19	0,74
C3L8	HH	4,57	0,73	5,54	1,27	0,31	0,08	0,30	0,07	14,51	1,49	18,17	10,01
	SH	5,65	1,30	5,57	0,69	0,47	0,13	0,38	0,05	12,11	1,01	14,60	2,41
C4L1	HH	3,65	1,63	3,49	1,15	0,45	0,16	0,40	0,13	8,07	0,47	8,81	0,79
	SH	5,11	1,63	3,74	1,15	0,60	0,16	0,41	0,13	8,52	0,56	9,06	1,27
C4L3	HH	2,26	0,99	2,34	1,64	0,19	0,10	0,10	0,07	11,69	2,37	22,58	13,45
	SH	3,51	0,91	2,64	0,75	0,32	0,11	0,20	0,10	10,83	1,54	13,46	4,62
C4L5	HH	2,93	0,58	3,51	0,68	0,23	0,06	0,28	0,05	12,95	1,45	12,57	0,76
	SH	4,26	1,24	4,46	0,97	0,34	0,12	0,34	0,06	12,37	1,36	13,19	1,84
C4L8	HH	4,28	0,80	5,67	0,99	0,27	0,05	0,40	0,03	15,73	0,65	14,33	3,05
	SH	5,08	0,70	6,05	0,38	0,36	0,05	0,42	0,06	14,11	0,88	14,42	2,22
C5L2	HH	4,02	0,57	4,38	0,74	0,27	0,04	0,35	0,06	14,75	0,36	12,36	1,51
	SH	6,11	2,10	5,18	1,07	0,49	0,21	0,40	0,08	12,48	1,69	13,06	0,55
zone pasto	HH	3,40	0,78	3,01	1,45	0,29	0,11	0,28	0,20	12,54	3,24	13,18	5,18
	SH	4,52	0,80	3,76	1,16	0,40	0,11	0,31	0,10	11,60	2,24	12,20	2,29

trait : traitement ; **m** :moyenne ; **sd** :écart-type ; **HH** :hors houppier ; **SH** : sous houppier ; **H1** : horizon 0-10cm ; **H2** : Horizon 10-30cm

Annexe 2. Valeurs des stocks de carbone et azote observées et leur rapport

Site	stockC(t/ha)			stockN(t/ha)			stockC/stockN		
	HH	SH	Totaux	HH	SH	Totaux	HH	SH	Totaux
C1L5	15,07	19,38	15,40	1,30	1,73	1,33	11,60	11,17	11,56
C2L1	8,70	15,02	9,29	0,92	1,59	0,98	9,43	9,44	9,43
C2L2	14,72	24,46	15,43	1,66	2,65	1,73	8,86	9,23	8,90
C2L6	10,82	15,95	11,94	0,60	1,24	0,74	18,15	12,90	16,22
C2L8	17,69	20,05	18,31	1,20	1,36	1,24	14,79	14,76	14,78
C3L2	13,53	24,59	14,51	1,42	2,60	1,52	9,56	9,47	9,55
C3L5	23,99	22,40	23,44	2,26	2,32	2,28	10,60	9,65	10,26
C3L6	11,29	17,93	12,58	0,73	1,20	0,82	15,50	14,96	15,35
C3L7	18,25	17,10	17,96	1,28	1,21	1,26	14,29	14,11	14,25
C3L8	25,74	26,22	25,88	1,58	1,96	1,69	16,31	13,40	15,36
C4L1	19,60	23,48	19,98	2,30	2,65	2,33	8,53	8,86	8,57
C4L3	13,14	17,18	15,39	0,77	1,39	1,12	17,04	12,33	13,77
C4L5	18,36	24,92	19,75	1,48	1,92	1,57	12,38	13,01	12,54
C4L8	27,03	28,70	28,01	1,85	1,97	1,92	14,60	14,58	14,59
C5L2	25,29	33,42	29,72	2,02	2,46	2,26	12,49	13,56	13,12
zone pastorale	17,55	22,05	18,51	1,42	1,88	1,52	12,94	12,10	12,55
Sd	5,83	5,19	6,02	0,54	0,55	0,52	3,13	2,24	2,63

Sd :écart-type ; **SH** : Sous-houppier ; **HH** :Hors houppier

Annexe 3. Données facteurs environnementaux

Site	Coord X (degré,minute,seconde)	Coord_Y (degré,minute,seconde)	Tx couv (%)	Biomasse (kg de matière sèche/ha)	Pluivio (mm/an)	Sol
C1L5	42°36'42.3"	1°40'5.574"	7,77	2620,16	433	RB
C2L1	46°10'13.799"	1°48'13.81"	9,32	980,00	283	RB
C2L2	46°35'53.88"	1°46'49.883"	7,30	1634,61	283	RB
C2L6	50.35'53.88"	1°37'37.2"	21,88	3229,15	565	F
C2L8	47°45'18.359"	1°34'13.386"	26,15	4003,40	675	S
C3L2	55°14'39.839"	1°46'44.058"	8,84	1422,07	292	RB
C3L5	54°29'8.52"	1°41'7.577"	34,76	2240,25	461	F
C3L6	56°15'28.8"	1°37'18.271"	19,38	3316,56	574	F
C3L7	55°51'18.36	1°35'18.888"	24,83	4063,45	692	F
C3L8	58°4'52.32"	1°32'19.774"	28,20	4591,70	836	S
C4L1	60°57'559"	1°46'53.602"	9,64	795,96	298	RB
C4L3	63°40'23.879"	1°42'28.66"	55,70	1751,97	480	F
C4L5	65°50'7.799"	1°38'2.116"	21,19	3764,29	590	F
C4L8	64°9'21.959"	1°29'41.942"	58,80	4674,97	828	S
C5L2	73°35'12.119"	1°33'59.357"	54,55	4186,74	719	S

Coord x : longitude ; **Coord Y** : latitude ; **Tx couv** : taux de couverture ; **Sol** : types de sol ;

Annexe 4 . P_value de corrélations entre les stocks et facteurs environnementaux au seuil de 5%

Facteurs	StockC			StockN			stockC/stockN		
	HH	SH	Totaux	HH	SH	Totaux	HH	SH	Totaux
Longitude	0.03	0.01	0.01	0.18	0.39	0.08	0.51	0.23	0.44
Lattitude	0.02	0.23	0.01	0.96	0.17	0.94	0.00	0.00	0.00
Tx.de.couverture	0.03	0.15	0.01	0.61	0.70	0.37	0.05	0.04	0.06
Biomasse	0.03	0.20	0.02	0.98	0.20	0.97	0.01	0.00	0.00
Pluviométrie	0.01	0.21	0.01	0.95	0.18	0.90	0.00	0.00	0.00
Types.de.sol	0.56	0.43	0.48	0.32	0.04	0.39	0.00	0.00	0.00