

Variability of soil carbon stocks under and outside the tree crown in the sylvopastoral zone of Senegal

Ange-Jokébed Adjoua N'Goran, Abdoul Aziz Diouf, Sékouna Diatta, Mohamed Habibou Assouma, Afolabi Juste Djagoun, Gildas Géraud Comlan Assogba, Laurent Cournac, Lydie Chapuis-Lardy, Vincent Blanfort, Simon Taugourdeau

▶ **To cite this version:**

Ange-Jokébed Adjoua N'Goran, Abdoul Aziz Diouf, Sékouna Diatta, Mohamed Habibou Assouma, Afolabi Juste Djagoun, et al.. Variability of soil carbon stocks under and outside the tree crown in the sylvopastoral zone of Senegal. Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux, 2022, 75 (3), pp.67-75. 10.19182/remvt.36984 . hal-03851550

HAL Id: hal-03851550
https://hal.inrae.fr/hal-03851550

Submitted on 14 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Variabilité des stocks de carbone du sol sous et hors houppier dans la zone sylvopastorale du Sénégal

Ange-Jokébed Adjoua N'Goran [1,2,3*] Abdoul Aziz Diouf [2]
Sékouna Diatta [3] Mohamed Habibou Assouma [4,5]
Afolabi Juste Djagoun [1,3] Gildas Géraud Comlan Assogba [3]
Laurent Cournac [6,7] Lydie Chapuis-Lardy [6,7]
Vincent Blanfort [4] Simon Taugourdeau [1,4]

Mots-clés

Evaluation des stocks de carbone, matière organique du sol, azote, savane, système sylvopastoral, Sahel

© A.-J.A. N'Goran et al., 2022
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Submitted: 20 November 2020
Accepted: 3 September 2022
Published: 30 September 2022
DOI: 10.19182/remvt.36984

Résumé

Le système d'élevage pastoral est critiqué pour son impact environnemental en raison des fortes émissions de gaz à effet de serre par unité de produit et l'effet néfaste sur le sol et la végétation. Au Sénégal, le stock de carbone dans la végétation est suivi par le Centre de suivi écologique dans 24 sites du Sahel depuis 1987. Toutefois, le stock de C du sol, paramètre essentiel aux processus d'humification de la litière des arbres et de rhizodéposition des herbacées, n'est pas pris en compte. Cette étude visait à déterminer l'influence de l'arbre et des facteurs environnementaux sur les teneurs en C du sol. Ainsi, 15 sites de suivi du Centre ont été sélectionnés, et 480 échantillons de sol ont été prélevés à 0–10 cm et 10–30 cm de profondeur sous et hors houppier. Les teneurs en C et en N totales ont été prédites par spectroscopie proche infrarouge (SPIR) et les stocks de C et de N calculés à partir de 60 échantillons de sol prélevés sous et hors houppier. Une analyse en composantes principales a permis d'identifier les facteurs impliqués dans la variation des stocks de C. Ainsi, dans la zone sylvopastorale du Sénégal, ces stocks ont varié le long d'un gradient nord-sud ; ils ont été positivement corrélés à la pluviométrie, au taux de couverture arborée et à la biomasse. Ils ont varié entre 9,3 et 29,7 Mg C/ha à 10–30 cm. A une échelle plus fine, l'arbre a induit une augmentation des teneurs en C et en N sous houppier dans l'horizon 0–10 cm. Cette étude a montré que les stocks de C du sol peuvent servir à déterminer les besoins de compensation des émissions de C dans le Sahel à travers la plantation d'arbres.

■ Comment citer cet article : N'Goran A.-J.A., Diouf A.A., Diatta S., Assouma M.H., Djagoun A.J., Assogba G.G.C., Cournac L., Chapuis-Lardy L., Blanfort V., Taugourdeau S., 2022. Variability of soil carbon stocks under and outside the tree crown in the sylvopastoral zone of Senegal. *Rev. Elev. Med. Vet. Pays Trop.*, 75 (3): 67-75, doi: 10.19182/remvt.36984

■ INTRODUCTION

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 la production agricole brute mondiale (Lecomte et Blanfort, 2013). Dans les pays sahéliens, l'élevage et en particulier le système pastoral, représente jusqu'à 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 instaure le pastoralisme comme le système de production le mieux adapté à cette zone (Gerber et al., 2012). 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). 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 Sénégal par exemple les pâturages naturels sont l'occupation du sol majoritaire dans le nord et l'est du pays.

Néanmoins, à l'instar de l'élevage à l'échelle mondiale, ces systèmes sont souvent critiqués pour leurs impacts sur le climat (Gerber et al., 2013). En effet, les systèmes pastoraux étant très peu productifs, leurs

1. CIRAD, UMR SELMET, PPZS (Dryland and Pastoralism), Dakar, Sénégal.
2. Centre de suivi écologique (CSE), Dakar, Sénégal.
3. UCAD FST, Département biologie végétale, Dakar, Sénégal.
4. CIRAD, UMR SELMET, F-34398 Montpellier, France. SELMET, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.
5. CIRAD, UMR SELMET, DP ASAP (systèmes agro-sylvo-pastoraux en Afrique de l'Ouest), Bobo Dioulasso, Burkina Faso.
6. Eco&Sols, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France.
7. LMI IESOL, Dakar, Sénégal.

* Auteur pour la correspondance
Email : jokebedngoran@gmail.com

émissions rapportées à la production (en kilogramme de viande ou litre de lait) sont parmi les plus importantes du monde (Gerber et al., 2013 ; Assouma et al., 2014). Cependant, ces émissions pourraient être compensées à partir d'un stockage de carbone par les écosystèmes pastoraux afin d'équilibrer le bilan carbone (Assouma et al., 2019). De par l'activité photosynthétique des plantes, 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 (Noble et al., 2000 ; Steinfeld et al., 2009 ; Blanfort et Stahl, 2013). Des études ont été réalisées pour déterminer les teneurs en carbone (C) et azote (N), et les stocks de C du sol dans quelques zones du Ferlo et les Niayes sénégalais (Woomer et al., 2004 ; Akpo et al., 2005 ; Marone et al., 2017). Marone et al. (2017) montrent que le stockage de C se fait en fonction du mode d'utilisation des sols avec, selon Woomer et al. (2004), près de 60 % du stock de C du sol contenu dans les 20 premiers centimètres. La composition en espèces de la végétation est le principal déterminant de la qualité de la litière produite dans l'écosystème et des stocks de C. Cette composante détermine le niveau d'activité des organismes du sol responsables de la décomposition de la matière organique, qui influence donc le taux de libération des nutriments dans le milieu (C et N).

Cependant, ces zones d'études sont représentatives d'une partie seulement de la zone pastorale du Sénégal. Il est important d'appréhender la variabilité spatiale de ces stocks pour ensuite évaluer le bilan carbone de l'élevage à l'échelle nationale. La présence des arbres dans cette zone pourrait par ailleurs présenter de multiples avantages dont le stockage de la matière organique dans le sol (Bernhard-Reversat, 1982 ; Weltzin et Coughenour, 1990 ; Wezel et al., 2000). L'objectif principal de cette étude a été de déterminer l'influence de la strate ligneuse sur les teneurs en C et en N du sol. Secondairement, ce travail a cherché à identifier les facteurs environnementaux (taux de couverture, biomasses arborée et herbacée, pluviométrie, et types de sol) influençant la variation des stocks de C et de N dans la zone sylvopastorale du Sénégal. Les hypothèses de ces travaux ont été, d'une part, que l'arbre entraîne une augmentation des teneurs et stocks de C sous les arbres et, d'autre part, qu'il crée une hétérogénéité spatiale du stock de C dans le sol au sein des parcours pastoraux du Sénégal.

MATERIEL ET METHODES

Zone d'étude

L'étude a été menée sur 15 sites du Centre de suivi écologique (CSE) établis pour le suivi de la biomasse végétale au Sénégal. Ces sites sont situés dans cinq écorégions selon le découpage de Tappan et al. (2004) (figure 1), avec une pluviométrie annuelle qui varie entre 150 mm et 800 mm (tableau I). Ils hébergent différents types de sols (Jones et al., 2013) : Arénosols, Acrisols, Cambisols, Gleysols, Lixisols, Régosols et Vertisols (IUSS-WRB, 2015). La végétation est composée de steppes d'arbustes, et de savanes arborée et arbustive relativement denses (le matériel supplémentaire I liste les espèces présentes sur les sites).

Prélèvement et préparation des échantillons de sol

Les échantillons de sol ont été prélevés suivant la méthode du point centré quadrant (Clark et Evans en 1954) à deux profondeurs : de 0 à 10 cm et de 10 à 30 cm. Sur chaque site de 900 ha chacun nous avons identifié des placettes de 20 m de rayon, situées à 200 m et 600 m, suivant un transect de 1000 m prédéfini par le CSE, pour permettre le suivi annuel de la biomasse. Ensuite, la perpendiculaire au transect passant par le centre de la placette a été tracée à l'aide d'un double décamètre (figure 2). De façon aléatoire, deux prélèvements ont été effectués hors houppier 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 ces points hors houppier, une distance d'au moins 10 m des arbres a été considérée pour minimiser l'impact du couvert arboré. Les échantillons prélevés ont été mélangés par quadrant et par profondeur pour obtenir un échantillon composite par profondeur et par point de mesure. Ensuite dans chacun des quatre quadrants, l'arbre le plus proche du centre de la placette, d'une hauteur supérieure à 3 m, a été choisi (figure 2). Sous chaque arbre, quatre prélèvements ont été effectués dans les quatre directions (nord, sud, est et ouest) à la distance de la demi-couronne (rayon divisé par 2). A l'instar des prélèvements hors houppier, les prélèvements obtenus sous houppier ont

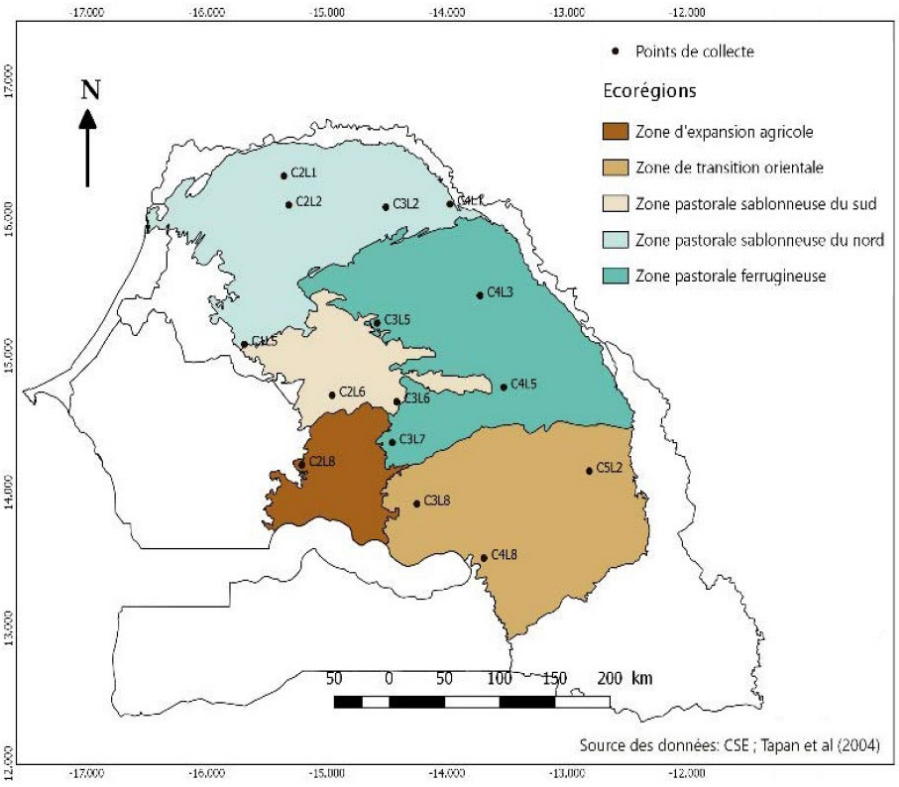


Figure 1 : Localisation des sites de l'étude dans la zone sylvopastorale du Sénégal. Sources : CSE, points de collecte ; Tapan et al., 2004, zones écologiques /// *Location of study sites in the sylvopastoral zone of Senegal. Sources: CSE, collection sites; Tapan et al., 2004, ecological areas*

Tableau I : Description des sites selon la classification de Tapan et al. (2004) et IUSS-WRB (2015) /// *Description of sites according to Tapan et al. (2004) and IUSS-WRB (2015) classification*

Région	Pluviométrie	Type de sol	Végétation prédominante	Site
Région pastorale sablonneuse du nord	150–300 mm	Arénosol	Steppes d'arbustes et prairies	C1L5, C2L1, C2L2, C3L2, C4L1
Région pastorale sablonneuse du sud	300–500 mm	Acrisol, Cambisol	Arbustes et savanes arborées	C2L6, C3L6
Région pastorale ferrugineuse	300–600 mm	Arénosol, Lixisol, Acrisol	Savanes arbustives et sols nus, souvent relativement denses	C3L5, C3L7, C4L3, C4L5
Région de transition orientale	500–600 mm	Vertisol, Gleysol, Acrisol	Savanes arborées et savanes boisées avec de petites zones de production agricole	C3L8, C4L8, C5L2
Région d'expansion agricole	500–800 mm	Vertisol	Arbustes et arbres dégradés, légèrement plus denses dans le sud ; occupation agricole dans les larges vallées et terrasses	C2L8

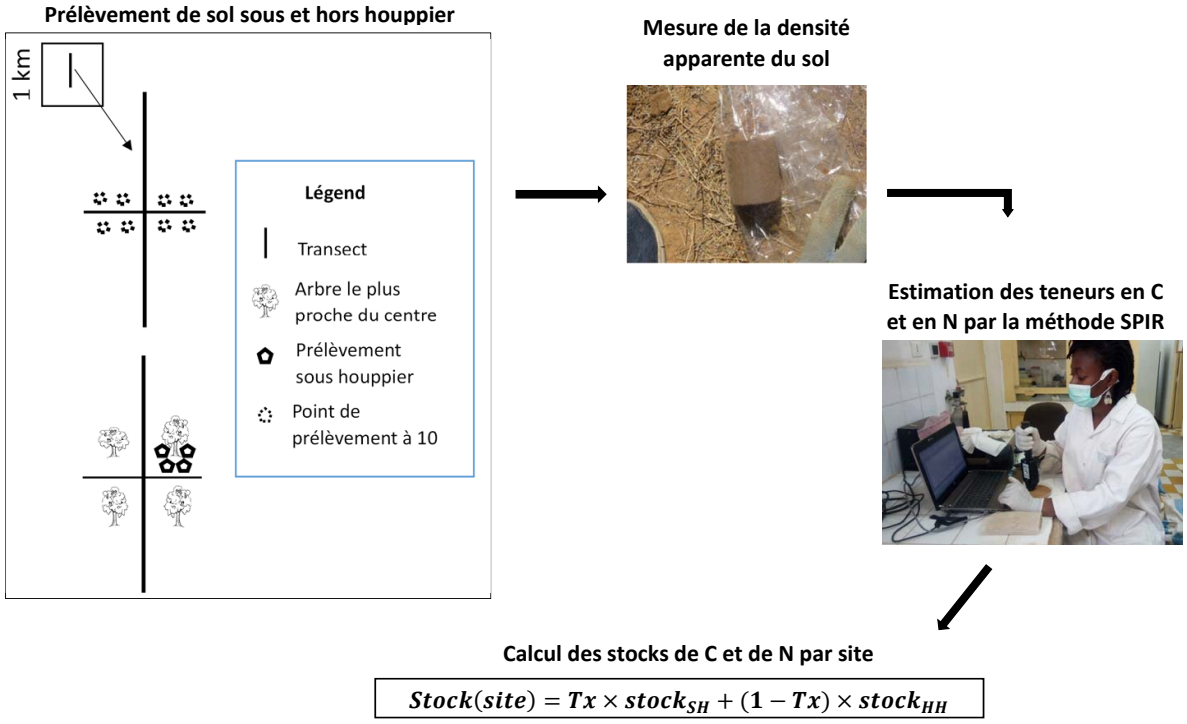


Figure 2 : Représentation de l'étape méthodologique de l'étude des teneurs et stocks de C et de N dans la zone sylvopastorale du Sénégal /// *Representation of the methodological stage of the study of C and N contents and stocks in the sylvopastoral area of Senegal*

été mélangés dans des bassines pour obtenir un échantillon composite par profondeur et par arbre.

Au total, 480 échantillons ont été prélevés correspondant à 15 sites x 2 types de couvert (sous houppier, hors houppier) x 2 profondeurs x 8 répétitions. Le sol a ensuite été séché à l'air, puis tamisé à 2 mm pour la préparation des échantillons à passer à la spectroscopie proche infrarouge (SPIR).

Détermination de la densité apparente

Soixante prélèvements de sol correspondant à 15 sites x 2 types de couverts x 2 profondeurs ont été réalisés à l'aide d'un cylindre de 100 cm^3 et 5 cm de hauteur (figure 2). Nous avons supposé que les densités apparentes (Da) mesurées à 2,5–7,5 cm et 17–22 cm étaient représentatives respectivement des da à 0–10 cm et 10–30 cm. Etant donné la friabilité du sol durant la saison sèche, le sol a été humidifié avec de l'eau pour faciliter son prélèvement. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'étuve à 105 °C pendant 48 h avant d'être pesés pour déterminer leur poids sec rapporté au volume du cylindre (g/cm^3). La masse volumique apparente (ou Da) correspond à la mesure de la masse du sol par unité de volume et est calculée selon la formule de Iris (1986) :

$Da\ (g/cm^3) = m/v$ (Equation 1)

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

Estimation des teneurs en carbone et en azote totales du sol

Les 480 échantillons de sol tamisés à 2 mm ont été tous scannés avec un spectrophotomètre portable LabSpec 4 Standard-Res Lab Analyzer pour collecter leurs données spectrales. La réflectance diffuse

a été mesurée dans la gamme spectrale de 350 à 2500 nm à 1 nm d'intervalle. Les données spectrales ont été enregistrées sous forme d'absorbance (*A*) selon l'équation de Cambou et al. (2016) :

$A = log\ 1/R$ (Equation 2)

où *R* est la réflectance.

Par la suite, les teneurs en C et en N totales des échantillons ont été estimées à l'aide du modèle de prédiction des teneurs en C et N des sols, développé par Assouma et al. (2019). Ce modèle, où N calibration = 116, N validation = 55, R^2val = 0,89, RPD = 2,96 (RPD : ratio de l'écart-type sur l'erreur standard de la prédiction corrigée par le biais), a été établi avec des valeurs de références issues des sols prélevés entre 0 et 30 cm de profondeur autour du forage de Widou et du Centre de recherche zootechnique (CRZ) de Dahra dans le Nord Sénégal. La base de calibration d'Assouma et al. (2019) ne couvrant pas tous les types de sols et la diversité des spectres de notre zone d'étude, une sélection de 63 échantillons complémentaires parmi ceux prélevés sur le terrain à analyser a été réalisée pour tester la qualité de la calibration et elle a par ailleurs permis d'enrichir la base de calibration. Cette base de données a été divisée en deux groupes : un groupe d'échantillons qui a servi au développement des calibrations, un autre pour la validation. Différentes méthodes de prétraitements ont été testées et le modèle de calibration avec le meilleur RPD a été retenu. Les teneurs en C et N totales de ces échantillons tamisés à 2 mm ont été analysées par combustion sèche avec un analyseur élémentaire (Thermo Fisher Scientific CHN NA2000, Waltham, MA, USA).

Etude de la variabilité des stocks totaux

Selon la formule développée par Don et al. (2007), le calcul du stock de C prend en compte la teneur en C, la profondeur du sol, la Da et le taux de terre fine obtenu après tamisage du sol à 2 mm. Dans les échantillons étudiés, les éléments de taille supérieure à 2 mm représentaient moins de 1 % de la masse de chaque échantillon de sol et ont donc été considérés comme négligeables (TF = 1). Les stocks sous houppier (SH) et hors houppier (HH) ont été calculés selon la formule de Don et al. (2007) :

$$Stock\ (SH\ ou\ HH) = \sum_{i=1}^{2} Da_i \times Ct_i \times P_i\ x\ TF \quad \text{(Equation 3)}$$

où Da_i est la densité apparente par site (g/cm^3), Ct_i la teneur en C du sol (mg/g), P_i l'épaisseur (1 = 10 cm ; 2 = 30 cm), et *TF* le taux de terre fine (TF = 1).

Par ailleurs, les stocks totaux, aussi bien pour C que pour N des sites, ont été calculés en rapportant la valeur des stocks sous et hors houppier au taux de couverture arborée des sites selon la formule :

$$Stock(site) = Tx \times stock_{SH} + (1 - Tx) \times stock_{HH} \quad \text{(Equation 4)}$$

où *Tx* correspond au taux de couverture (%), $stock_{SH}$ au stock sous houppier (t/ha) et $stock_{HH}$ au stock hors houppier (t/ha).

Ainsi, nous avons calculé les stocks de C sous et hors houppier, et les stocks totaux de C par site. Ensuite, sur la base des stocks totaux calculés, un krigeage de variogramme linéaire d'équation $15{,}25 + 6{,}67.10^{-5}x$ avec un R^2 de 80,6 (où *x* représente la distance entre les stocks totaux) a été effectué à partir des logiciels de cartographie SAGAGis et QGIS version 3.0.2 pour obtenir une projection des moyennes de stocks à travers la zone sylvopastorale.

Analyses statistiques

Le traitement des données a consisté à vérifier la significativité statistique des différences observées sous et hors houppier entre les différents sites pour les teneurs en C et N, et les stocks de C et N. Le test t de Student au seuil de 5 % a permis de comparer les teneurs observées en fonction des profondeurs. Les facteurs environnementaux considérés ont été les taux de couverture, la biomasse arborée et herbacée, les types de sol, et la pluviométrie (tableau II). Pour déterminer l'impact de ces derniers sur les stocks sous et hors houppier et le stock total par site (mat. suppl. II), une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R version 3.4.2.

Tableau II : Facteurs environnementaux dans la zone sylvopastorale du Sénégal /// *Environmental factors in the sylvopastoral area of Senegal*

Site	Long.	Lat.	Tx couv	Biomasse	Pluvio.	Sol
C1L5	42°36′	1°40′	7,8	2620	433	Arénosol
C2L1	46°10′	1°48′	9,3	980	283	Arénosol
C2L2	46°35′	1°46′	7,3	1635	283	Arénosol
C3L2	55°14′	1°46′	8,8	1422	292	Arénosol
C4L1	60°57′	1°46′	9,6	796	298	Arénosol
C2L6	50°35′	1°37′	21,9	3229	565	Acrisol
C3L6	56°15′	1°37′	19,4	3317	574	Cambisol
C3L5	54°29′	1°41′	34,8	2240	461	Arénosol
C3L7	55°51′	1°35′	24,8	4063	692	Lixisol
C4L3	63°40′	1°42′	55,7	1752	480	Arénosol
C4L5	65°50′	1°38′	21,2	3764	590	Acrisol
C3L8	58°04′	1°32′	28,2	4592	836	Gleysol
C4L8	64°09′	1°29′	58,8	4675	828	Acrisol
C5L2	73°35′	1°33′	54,6	4187	719	Vertisol
C2L8	47°45′	1°34′	26,2	4003	675	Vertisol

Long. : longitude ; Lat. : latitude ; Tx couv : taux de couverture arborée (%), CSE ; Biomasse : biomasse arborée et herbacée moyenne de 2010 à 2016 en kg de matière sèche / ha, CSE ; Pluvio. : pluviométrie moyenne de 1964 à 2014 en mm/an, HarvestChoice ; Sol : types de sol d'après Jones et al. (2013) selon la classification de IUSS-WRB (2015) /// *Long: longitude; Lat.: latitude; Tx couv: tree cover rate (%), CSE; Biomass: average tree and grass biomass from 2010 to 2016 in kg dry matter / ha, CSE; Pluvio.: average rainfall from 1964 to 2014 in mm/year, HarvestChoice; Soil: soil types from Jones et al. (2013) according to IUSS-WRB (2015) classification*

■ RESULTATS

Comparaison des teneurs en C et N sous houppier et hors houppier

Les données des teneurs en carbone et azote sont disponibles dans le matériel supplémentaire III. Les teneurs moyennes en C sous et hors houppier ont été respectivement de 4,2 ± 1,2 et 3,3 ± 1,1 g.kg^{-1} à 0–10 cm de profondeur, et de 3,3 ± 1,3 et 2,8 ± 1,2 g.kg^{-1} à 10–30 cm de profondeur (figure 3). Les teneurs en C ont été significativement plus élevées sous houppier que hors houppier à 0–10 cm ($p = 2{,}51.10^{-9}$). Pour N, les teneurs moyennes sous et hors houppier ont été respectivement de 0,4 ± 0,1 g.kg^{-1} et 0,3 ± 0,1 g.kg^{-1} à 0–10 cm de profondeur, et de 0,3 ± 0,1 g.kg^{-1} et 0,2 ± 0,1 g.kg^{-1} à 10–30 cm de profondeur. Les teneurs en N ont été significativement plus élevées sous houppier que hors houppier à 0–10 cm ($p = 3{,}32.10^{-10}$). Le rapport C/N des sols sous et hors houppier n'a pas différé significativement au niveau de la profondeur de prélèvement 0–10 cm contrairement à celui des prélèvements à 10–30 cm. En effet, C/N a été significativement plus faible sous houppier que hors houppier à la profondeur 10–30 cm.

Stocks calculés

Les données des Da par site en fonction de la profondeur sous et hors houppier sont disponibles dans le matériel supplémentaire IV. Elles ont varié en fonction des sites et de la profondeur et ont été en moyenne comprises entre 1,7 et 2,2 g.cm^{-3}. Sous houppier elles ont varié entre 1,7 g.cm^{-3} et 2 g.cm^{-3} à 0–10 cm, et entre 1,7 g.cm^{-3} et 2,2 g.cm^{-3}

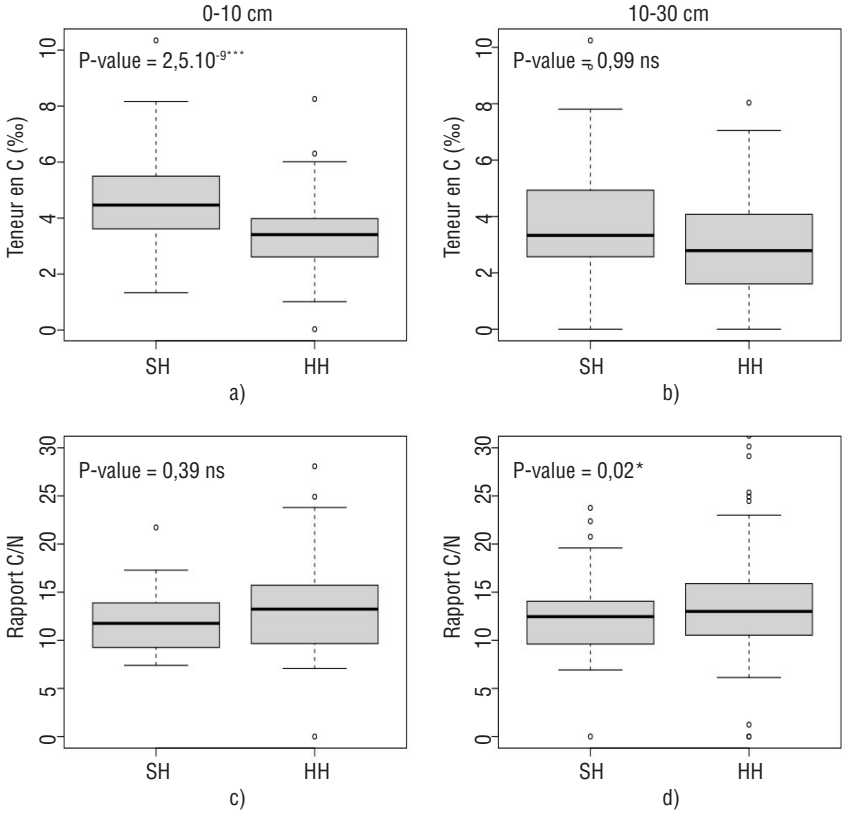


Figure 3 : Différences sous houppier (SH) et hors houppier (HH) des teneurs en C et du rapport C/N du sol à 0–10 cm (a et c) et 10–30 cm (b et d) de profondeur dans la zone sylvopastorale du Sénégal /// *Differences in soil C content and C/N ratio at 0–10 cm (a and c) and 10–30 cm (b and d) depths in the sylvopastoral area of Senegal under the tree crown (SH) and outside the tree crown (HH)*

à 10–30 cm. Hors houppier, elles ont varié entre 1,8 g.cm^{-3} et 2 g.cm^{-3} à 0–10 cm, et entre 1,7 g.cm^{-3} et 2,2 g.cm^{-3} à 10–30 cm.

Les stocks moyens de C sous houppier, hors houppier et totaux ont été respectivement de 22,1 ± 5,2 Mg C/ha, 17,6 ± 7,8 Mg C/ha, et 18,5 ± 6,0 Mg C/ha. Les stocks de C à 0–30 cm ont été compris entre 9,3 et 29,7 Mg C/ha (mat. suppl. II). Pour la majorité des sites, les stocks de C sous houppier ont été supérieurs aux stocks hors houppier (figure 4). Toutefois, les sites C3L5 et C3L7 ont présenté une tendance contraire avec des stocks sous houppier inférieurs aux stocks hors houppier.

En tenant compte des coefficients de corrélation (tableau III) et de l'ACP (figure 5) les stocks de C hors houppier ont été significativement corrélés avec le taux de couverture en arbre, la biomasse totale et la pluviométrie. De même, les rapports des stocks de C sur les stocks de N hors houppier, sous houppier et totaux ont été significativement corrélés avec la pluviométrie et la biomasse. A l'échelle de la zone sylvopastorale du Sénégal, le stock de C a évolué selon un gradient nord-sud (figure 6).

La figure 7 présente les stocks totaux en fonction des amplitudes pluviométriques 150–300 mm (5 sites : C1L5, C2L1, C2L2, C3L2, C4L1), 300–600 mm (6 sites : C2L6, C3L6, C3L5, C3L7, C4L3, C4L5), 500–800 mm (4 sites : C3L8, C4L8, C5L2, C2L8). Cette figure montre que les stocks totaux les plus élevés ont été notés dans l'amplitude pluviométrique la plus élevée. Inversement, les stocks les moins élevés ont été observés dans celle la plus faible.

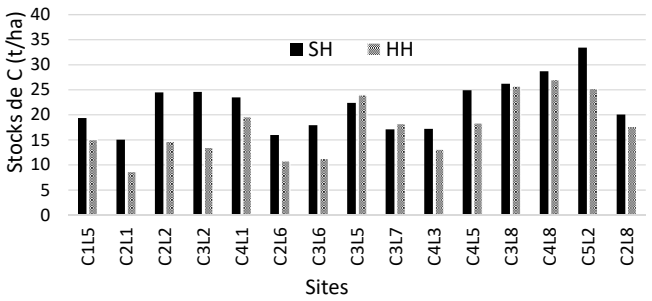


Figure 4 : Stocks de carbone du sol sous houppier (SH) et hors houppier (HH) en fonction des sites de l'étude dans la zone sylvopastorale du Sénégal /// *Soil carbon stocks under the tree crown (SH) and outside the tree crown (HH) according to the study sites in the silvopastoral zone of Senegal*

■ DISCUSSION

Influence des arbres sur les teneurs en C et N

Les teneurs moyennes à 0–10 cm en C et N (respectivement 4,2 ± 1,2 g.kg-^{1} et 0,4 ± 0,1 g.kg-^{1} sous houppier) ont été du même ordre de

Tableau III : Coefficients de corrélations entre les stocks de la zone sylvopastorale du Sénégal et les facteurs environnementaux /// *Correlation coefficients between stocks in the sylvopastoral area in Senegal and environmental factors*

	Stock C			Stock C / stock N		
Facteurs	**HH**	**SH**	**Totaux**	**HH**	**SH**	**Totaux**
Longitude	0,31*	0,39*	0,44*	0,03	0,11	0,05
Latitude	0,36*	0,11	0,38*	0,48	0,80	0,70
Taux de couverture	0,32*	0,15	0,42*	0,26	0,28	0,24
Biomasse	0,31*	0,12	0,33*	0,41*	0,78	0,65
Pluviométrie	0,39*	0,12	0,41*	0,50*	0,77	0,69

SH : sous houppier ; HH : hors houppier ; * R^2 significatif à 5 % /// *SH: under the tree crown; HH: outside the tree crown; * R^2 significant at 5%*

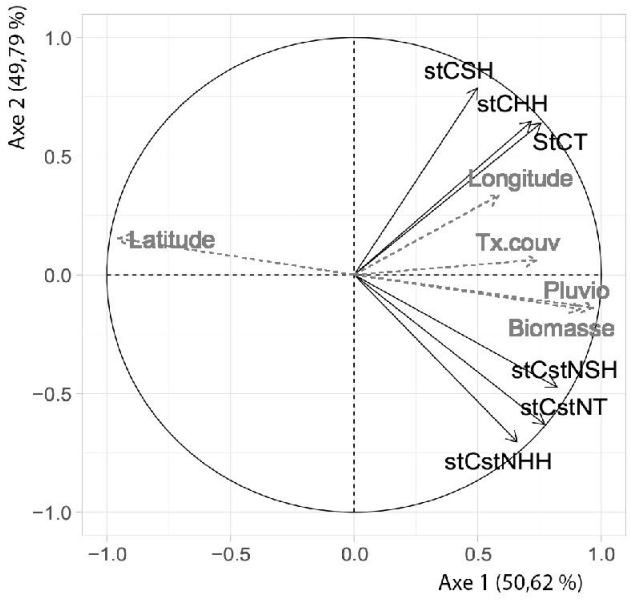


Figure 5 : Analyse en composante principale sur les données de stocks et les facteurs environnementaux de la zone sylvopastorale du Sénégal ; stC.SH : stock de C sous houppier ; stCHH : stock de C hors houppier ; stCT : stock total de C ; stCstNSH : rapport stock de C et stock de N sous houppier ; stCstNHH : rapport stock de C et stock de N hors houppier ; stCstNT : rapport stock C et stock de N totaux /// *Principal component analysis of stock data and environmental factors in the sylvopastoral area of Senegal; stC.SH: under the tree-crown C stock; stCHH: outside the tree-crown C stock; stCT: total C stock; stCstNSH: C stock to N stock ratio under the tree crown; stCstNHH: C stock to N stock ratio outside the tree crown; stCstNT: total C stock to N stock ratio*

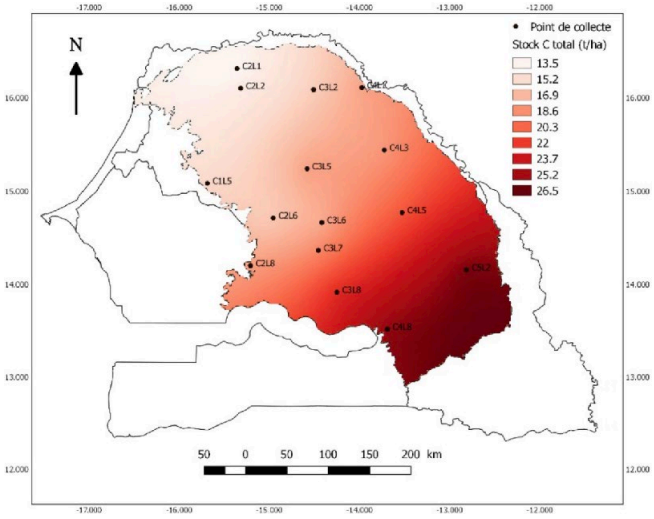


Figure 6 : Variabilité spatiale des stocks totaux de C dans la zone sylvopastorale du Sénégal /// *Spatial variability of total C stocks in the silvopastoral area of Senegal*

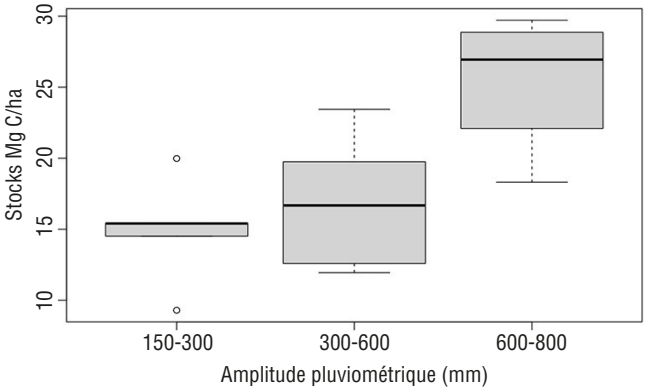


Figure 7 : Stocks de C totaux en fonction de l'amplitude pluviométrique à travers la zone sylvopastorale du Sénégal /// *Total C stocks according to rainfall range across the silvopastoral area of Senegal*

grandeur que celles observées par Assouma et al. (2017) à Widou au nord de la zone sylvopastoral du Sénégal. Nos résultats montrent que les teneurs en C et en N ont été significativement plus élevées sous houppier que hors houppier. L'écart a été plus prononcé au niveau de l'horizon de surface 0–10 cm. Cela pourrait s'expliquer par une teneur en matière organique du sol (MOS) plus élevée sous le houppier que hors houppier en raison en partie de la production de litière par l'arbre. En effet, les nutriments récupérés par l'arbre sont retournés au sol par la litière des feuilles, des tiges et des racines (Belsky et al., 1989 ; Claude et al., 1991). La MOS 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. Cela révèle une influence positive majoritaire sur le sol des arbres par rapport aux herbacées, qui pourrait favoriser une meilleure fertilité des sols sous houppier qu'en dehors. Ce constat a également été fait dans la zone sylvopastorale du Ferlo au nord du Sénégal par Akpo et al. (2005), au Kenya par Belsky et al. (1989), et au Burkina Faso par Kessler (1992).

De plus, l'étude du rapport C/N couplée au taux élevé des teneurs en N suggère une décomposition microbienne des matières organiques du sol plus élevée sous les arbres. Cette activité biologique entrainerait une augmentation de la production primaire, et de la litière aérienne et souterraine sous les arbres. Apko et al. (2005) soulignent également de meilleures propriétés chimiques du sol sous les arbres dans la zone sylvopastorale septentrionale.

Par ailleurs, l'influence du type de végétation sur les teneurs en C organique du sol a été observée par Jobbágy et Jackson (2000). Ils montrent que la distribution du C organique du sol a une corrélation plus forte avec le type de végétation qu'avec le type de sol. Cette hypothèse pourrait expliquer la présence sur certains sites de teneurs en C et en N inférieures sous houppier qu'en dehors (C4L5 et C4L8 ; mat. suppl. III). Cela pourrait également être dû à une couverture herbacée sous l'arbre plus faible que hors houppier sur ces sites entrainant une accumulation de MOS sous houppier plus faible qu'en dehors. En effet, relevant l'importance de la strate herbacée dans la production de MOS, Bernhard-Reversat (1982) a constaté une accumulation de MOS sous houppier plus petite que hors sur des sites où la couverture herbacée sous les arbres était plus faible que hors houppier.

Influence des arbres sur les stocks de carbone

En général, les stocks de C ont été plus élevés sous houppier que hors houppier avec deux sites sur 15 où une tendance contraire a été observée. Comparativement aux 13 autres, ces deux sites présentent à la fois une strate arborée monospécifique (*Pterocarpus lucens* pour C3L5 et *Combretum glutinosum* pour C3L7) et des stocks de N sous houppier égaux aux stocks hors houppier. De plus selon la description de Tappan et al. (2004) ces sites se trouvent dans une écorégion significativement affectée par la sécheresse et l'augmentation des sols dégradés (0,3 % en 1965 à environ 4,5 % en 1999). Cela révèle que la variation du stock de C peut être liée aux facteurs du sol et à la composition de la strate arborée. En effet, la variabilité spatiale du C

organique du sol est fonction des conditions du sol qui déterminent les taux de décomposition de la matière organique mais aussi de la composition de la canopée (Yuan et al., 2013). En outre, les résultats de stocks reflètent les mêmes tendances que les teneurs en C et en N organiques des sols. Melillo et al. (1982) montrent que la grande disponibilité de N sous les arbres semble favoriser une augmentation du taux de biodégradation de la litière et de la MOS entrainant donc un meilleur stockage du C. Bernhard-Reversat (1982) montre également que l'arbre induit l'accumulation des graines apportées par le vent sous les arbres près du tronc entrainant une augmentation de la production d'herbes responsables de la MO du sol. Cette augmentation de la masse végétale épigée entraine une augmentation du remplacement (*turnover*) racinaire qui induit une augmentation du stockage de la MOS et donc du C organique du sol (Flaig, 1976).

Variabilité spatiale des stocks de carbone

La valeur de stock de C total observée (18,5 Mg C/ha) a été du même ordre de grandeur que celle obtenue dans la zone de parcours désertiques et buissonnants selon la classification de Henry et al. (2009), et celle trouvée par Woomer et al. (2004) (respectivement 15,4 Mg C/ha et 17,2 Mg C/ha). Comparativement à l'étude de ces derniers auteurs, l'étendue des stocks de C à travers le Sénégal est du même ordre de grandeur avec 11,6 à 25,3 Mg C/ha dans leur étude, et 9,3 à 29,7 Mg C/ha dans notre étude. Il faut cependant noter que leurs données ont été obtenues avec une profondeur de 40 cm contre 30 cm dans notre étude. La variation des stocks de C du sol a été liée à un gradient nord-sud des facteurs environnementaux car les fluctuations des précipitations influencent la densité des arbres feuillus (Hiernaux et al., 1994) et la productivité des pâturages sahéliens (Penning de Vries et Djitèye, 1982). De meilleures propriétés chimiques du sol déjà observées sous les arbres dans la zone sylvopastorale septentrionale (Akpo et al., 2005) et un microclimat sous couvert forestier peuvent induire une plus grande activité microbienne du sol (Diallo et al., 2017). Toutefois l'étendue des stocks montre que la moyenne est égale à deux fois le stock minimum, et le stock maximum fait environ trois fois le stock minimum révélant ainsi une variabilité des stocks à travers la zone sylvopastorale. A l'échelle du site, Marone et al. (2017) montrent une variation des stocks en fonction des types de végétation dans les Niayes au Sénégal : les jachères stockent plus de carbone dans le sol que les parcours naturels et les parcs arborés.

Il ressort de tout ce qui précède que le type de végétation influence les teneurs et les stocks en C organique du sol. Cette hypothèse n'a pas été testée dans cette étude. Toutefois, une reprise des mesures prenant en compte un inventaire du type de végétation et de la quantité de biomasse au niveau des points de mesure aiderait à la vérifier. De même, les travaux sur le bilan carbone de l'élevage d'Assouma et al. (2019) effectués dans la zone nord-ouest de la zone pastorale (zone présentant le moins de stocks de C dans cette étude) suggèrent l'importance de répliquer ces travaux dans des zones variées afin de tenir compte de la variabilité des écosystèmes pâturés.

■ CONCLUSION

Ces résultats montrent que les teneurs moyennes en C et en N sont supérieures sous houppier par rapport à celles mesurées hors houppier. Toutefois, certains sites ont présenté une tendance inverse. La même tendance a été observée au niveau des stocks de C organique du sol. En effet, les stocks de C sont de façon générale plus élevés sous les houppiers des arbres avec des sites présentant l'effet contraire. Plusieurs variables expliquent les différences de stocks entre sites : la position géographique qui implique des variations pluviométriques (gradient nord-sud) et un taux de couverture arborée plus important au sud. La plantation d'arbres en zone pastorale pourrait donc influencer le bilan carbone de ces espaces pastoraux. Cette étude propose une estimation des stocks de C dans une zone tropicale emblématique et peut constituer une base de l'évaluation des possibilités de compensation des émissions de C dans le Sahel à travers la plantation d'arbres. Les présents résultats pourraient être consolidés par des dispositifs de mesures sur un plus grand nombre de sites où seraient intégrés l'inventaire de la végétation, la durée de présence des animaux et/ou la collecte régulière des fèces sous les houppiers. Ces répétitions permettraient de tenir compte de la variabilité de recouvrement, des diverses espèces d'herbacées et de ligneux présentes, et de la dynamique du stock de C dans le sol.

Déclaration des contributions des auteurs

AJAN, ST, AAD, LCL, LC et MHA ont contribué à la conception de l'étude, à la collecte des données, à l'analyse et interprétation des données, à la rédaction de la première version du manuscrit, et à la révision critique du manuscrit. AJD a contribué à toutes ces activités excepté la conception de l'étude et la révision critique du document. GGCA a contribué au traitement des données. SD et VB ont essentiellement participé à la rédaction de la première version et à la révision critique du manuscrit.

Conflits d'intérêts

Cet article a été rédigé sans conflit d'intérêts.

Remerciements

Les auteurs remercient le pôle Pastoralisme et zones sèches en Afrique de l'Ouest (PPZS), le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), l'Institut sénégalais de recherches agricoles (ISRA), le Centre de suivi écologique (CSE), l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD), l'Institut de recherche pour le développement (IRD), le Centre d'étude régional pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse (CEERAS) et la Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) pour leur encadrement et le financement de ces travaux de recherche. Nous remercions également le laboratoire LAMA (UAR IMAGO de l'IRD) et le Laboratoire mixte international Intensification écologique des sols cultivés en Afrique de l'Ouest (LMI IESOL) pour l'appui matériel et technique.

REFERENCES

Akpo L.E., Banoin M., Grouzis M., 2003. Effet de l'arbre sur la production et la qualité fourragères de la végétation herbacée : bilan pastoral en milieu sahélien. *Rev. Méd Vét.*, **154** (10): 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 Afric. J. Appl. Ecol.* **7** (1): 41-52, doi: 10.4314/wajae.v7i1.45647

Akpo L.E., Grouzis M., 2000. Valeur pastorale des herbages en région soudanienne: le cas des parcours sahéliens du Nord-Sénégal. *Tropicultura*, **18** (1): 1-8

Assouma M.H., Hiernaux P., Lecomte P., Ickowicz A., Bernoux M., Vayssières J., 2019. Contrasted seasonal balances in a Sahelian pastoral ecosystem result in a neutral annual carbon balance. *J. Arid Environ.*, **162:** 62-73, doi: 10.1016/j.jaridenv.2018.11.013

Assouma M.H., Serça D., Guérin F., Blanfort V., Lecomte P., Touré I., Ickowicz A., et al., 2017. Livestock induces strong spatial heterogeneity of soil CO 2, N 2 O and CH 4 emissions within a semi-arid sylvo-pastoral landscape in West Africa. *J. Arid Land*, **9** (2): 210-221, doi: 10.1007/s40333-017-0001-y

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. Madrid, Spain, p. 19-20

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.* **26** (3): 1005-1024, doi: 10.2307/2403708

Bernhard-Reversat F., 1982. Biogeochemical Cycle of Nitrogen in a Semi-Arid Savanna. *Oikos*, **38** (3): 321, doi: 10.2307/3544672

Blanfort V., Stahl C., 2013. Actes de la journée : Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives, 1er octobre 2013, Cayenne, Guyane française. CIRAD, Montpellier, France, 72 p.

Cambou A., Cardinael R., Kouakoua E., Villeneuve M., Durand C., Barthès B.G., 2016. Prediction of soil organic carbon stock using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in the field. *Geoderma*, **261**: 151-159, doi: 10.1016/j.geoderma.2015.07.007

Claude J., Grouzis M., Milleville P., 1991. Un espace sahélien: la mare d'Oursi, Burkina Faso. ORSTOM, Paris, France, 241 p.

Diallo M.D., Goalbaye T., Mahamat-Saleh M., Sarr P.S., Masse D., Wood S.A., Diop L., 2017. Effects of major woody species of the Senegalese Great Green Wall on N mineralization and microbial biomass in soils. *Bois For. Trop.*, **333**: 43-54

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** (3-4): 272-282, doi: 10.1016/j.geoderma.2007.06.003

Flaig W., 1976. Soil organic matter studies. *At. Energy Rev.*, **14** (4): 735-742

Gerber P., Touré I., Ickowicz A., Garba I., Toutain B., 2012. Quels enjeux pour un système d'information sur le pastoralisme au Sahel? In: Atlas des évolutions des systèmes pastoraux au Sahel : 1970-2012. FAO, Rome, Italie, p. 2-3

Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., Falcucci A., et al., 2013. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. FAO, Rome, Italy, 115 p.

Henry M., Valentini R., Bernoux M., 2009. Soil carbon stocks in ecoregions of Africa. *Biogeosci. Discuss.*, **6** (1): 797-823, doi: 10.5194/bgd-6-797-2009

Hiernaux P.H., 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. Elev. Méd. Vét. Pays Trop.*, **47** (1): 117-125, doi: 10.19182/remvt.9123

Iris J.M., 1986. Analyse et interprétation de la variabilité spatiale de la densité apparente dans trois matériaux ferrallitiques. *Sci. Sol*, **24** (3): 245-256

IUSS-WRB W.G.W., 2015. Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014, Mise à jour 2015. Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. Rapport sur les ressources en sols du monde. FAO, Rome, Italie, 215 p.

Jobbágy E.G., Jackson R.B., 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.*, **10** (2): 423-436, doi: 10.1890/1051-0761

Jones A., Breuning-Madsen H., Brossard M., Dampha A., Deckers J., Dewitte O., Gallali T., et al., 2013. Soil atlas of Africa. Publications Office of the European Union, 176 p.

Kessler J.J., 1992. The influence of karité (Vitellaria paradoxa) and néré (Parkia biglobosa) trees on sorghum production in Burkina Faso. *Agrofor. Syst.*, **17** (2): 97-118, doi: 10.1007/BF00053116

Lecomte P., Blanfort V., 2013. Elevage, gaz à effet de serre et changements d'utilisation du territoire. In: Actes de la journée : Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives, 1er octobre 2013, Cayenne, Guyane française. CIRAD, Montpellier, France, p. 18-21

Marone D., Poirier V., Coyea M., Olivier A., Munson A.D., 2017. Carbon storage in agroforestry systems in the semi-arid zone of Niayes, Senegal. *Agrofor. Syst.*, **91** (5): 941-954, doi: 10.1007/s10457-016-9969-0

Melillo J.M., Aber J.D., Muratore J.F., 1982. Nitrogen and Lignin Control of Hardwood Leaf Litter Decomposition Dynamics. *Ecology*, **63** (3): 621-626, doi: 10.2307/1936780

Noble I., Bolin B., Ravindranath N., Verardo D., Dokken D., 2000. Land use, land use change, and forestry. *Environ. Conserv.*, **28** (3): 284-293

Penning de Vries F.W.T., Djitèye M.A. (Eds.), 1982. La productivité des pâturages sahéliens: une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. PUDOC, Wageningen, Pays Bas, 525 p.

Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., De Haan C., 2009. L'ombre portée de l'élevage : impacts environnementaux et options pour leur atténuation. FAO, Rome, Italie, 464 p.

Tappan G.G., Sall M., Wood E.C., Cushing M., 2004. Ecoregions and land cover trends in Senegal. *J. Arid Environ.*, **59** (3): 427-462, doi: 10.1016/j.jaridenv.2004.03.018

Weltzin J.F., Coughenour M.B., 1990. Savanna tree influence on understory vegetation and soil nutrients in northwestern Kenya. *J. Veg. Sci.*, **1** (3): 325-334, doi: 10.2307/3235707

Wezel A., Rajot J.L., Herbrig C., 2000. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. *J. Arid Environ.*, **44** (4): 383-398, doi: 10.1006/jare.1999.0609

Woomer P.L., Touré A., Sall M., 2004. Carbon stocks in Senegal's Sahel transition zone. *J. Arid Environ.*, **59** (3): 499-510, doi: 10.1016/j.jaridenv.2004.03.027

Yuan Z., Gazol A., Lin F., Ye J., Shi S., Wang X., Wang M., et al., 2013. Soil organic carbon in an old-growth temperate forest: Spatial pattern, determinants and bias in its quantification. *Geoderma*, **195-196**: 48-55, doi: 10.1016/j.geoderma.2012.11.008

Summary

N'Goran A.-J.A., Diouf A.A., Diatta S., Assouma M.H., Djagoun A.J., Assogba G.G.C., Cournac L., Chapuis-Lardy L., Blanfort V., Taugourdeau S. Variability of soil carbon stocks under and outside the tree crown in the sylvopastoral zone of Senegal

The pastoral livestock system is criticized for its environmental impact caused by high greenhouse gas emissions per unit of product, and the adverse effects on soil and vegetation. In Senegal, the carbon stock in vegetation has been monitored by the Center for Ecological Monitoring at 24 sites in the Sahel since 1987. However, soil C stock, an essential parameter for the humification process of tree litter and rhizodeposition of grasses, is not taken into account. This study aimed to determine the influence of tree and environmental factors on soil C content. Thus, 15 of the sites monitored in the Center were selected, and 480 soil samples were collected at 0–10 cm and 10–30 cm depth under and outside the tree crown. Total C and N contents were predicted by near-infrared spectroscopy (NIRS), and C and N stocks were calculated from 60 soil samples taken from under and outside the tree crown. A principal component analysis was carried out to identify the factors involved in C stock variation. Thus, in the sylvopastoral area of Senegal, these stocks varied along a north-south gradient; they were positively correlated with rainfall, tree cover, and biomass. They varied between 9.3 and 29.7 Mg C/ha at 10–30 cm. At a finer scale, the tree induced an increase in C and N contents under the crown in the 0–10 cm layer. This study showed that soil C stocks can be used to determine the need for C compensation in Sahel through tree planting.

Keywords: carbon stock assessments, soil organic matter, nitrogen, savannahs, silvopastoral systems, Sahel

Resumen

N'Goran A.-J.A., Diouf A.A., Diatta S., Assouma M.H., Djagoun A.J., Assogba G.G.C., Cournac L., Chapuis-Lardy L., Blanfort V., Taugourdeau S. Variabilidad de las reservas de carbono del suelo bajo el dosel y fuera del mismo en la zona silvopastoral del Senegal

El sistema de ganadería pastoral es criticado por su impacto ambiental debido a las elevadas emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de producto y por su efecto adverso sobre el suelo y la vegetación. En Senegal, el Centro de Seguimiento Ecológico lleva a cabo un seguimiento del carbono almacenado en la vegetación en 24 zonas del Sahel desde 1987. Sin embargo, no se tiene en cuenta el almacenaje de C en el suelo, un parámetro esencial en los procesos de humificación de la hojarasca de los árboles y la rizodeposición de las plantas herbáceas. Este estudio tenía como objetivo determinar la influencia de los árboles y los factores ambientales en el contenido de C del suelo. Así pues, se seleccionaron 15 zonas de seguimiento del Centro y se tomaron 480 muestras de suelo a 0–10 cm y 10–30 cm de profundidad por debajo del dosel y fuera del mismo. El contenido total de C y N se estimó mediante espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) y el C y el N almacenados se calcularon a partir de 60 muestras de suelo tomadas debajo de las copas y fuera de ellas. Se utilizó el análisis de componentes principales para identificar los factores implicados en la variación del C almacenado. Así, en la zona silvopastoral del Senegal, estas reservas variaban a lo largo de un gradiente norte-sur; correlacionándose positivamente con la pluviometría, la tasa de cobertura arbórea y la biomasa. Variaron entre 9,3 y 29,7 Mg C/ha a 10–30 cm. A una escala más fina, el árbol indujo un aumento del contenido de C y N bajo la copa en el horizonte de 0–10 cm. Este estudio demostró que las reservas de C del suelo pueden utilizarse para determinar la necesidad de compensación de las emisiones de C en el Sahel mediante la plantación de árboles.

Palabras clave: estimación de las existencias de carbono, materia orgánica del suelo, nitrógeno, sabanas, sistemas silvopascícolas, Sahel