

# UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



## UFR DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

\*\*\*\*\*

### DEPARTEMENT D'AGROFORESTERIE

## Mémoire de Master

**Spécialité :** Aménagement et Gestion Durable des Ecosystèmes Forestiers et  
Agroforestiers (AGDEFA)

# Déterminants de la variation spatiale du stock de carbone du sol à travers le Sénégal

Présenté par :

**Diry DIOP**

Encadrants : Dr Ismaïla COLY, Maître de Conférences (UASZ),

Dr Abdoul Aziz DIOUF, Chercheur au CSE (Dakar)

Dr Simon TAUGOURDEAU, chercheur au CIRAD (France)

Soutenu publiquement le 13 août 2024 devant le jury composé de :

Président:	<b>M. Mohamed M. CHARAHABIL</b>	Maître de conférences	UFR-ST / UASZ
Membres:	<b>M. Joseph Saturnin DIEME</b>	Maître Assistant	UFR-ST / UASZ
	<b>M. Boubacar CAMARA</b>	Maître Assistant	UFR-ST / UASZ
	<b>M. Abdoul Aziz DIOUF</b>	Chercheur	CSE/ Dakar
	<b>M. Simon TAUGOURDEAU</b>	Chercheur	CIRAD/France
	<b>M. Ismaïla COLY</b>	Maître de Conférences	UFR-ST / UASZ

## **DEDICACES**

Je dédie ce mémoire à tous ceux qui me sont chers et à tous ceux qui m'ont accompagné de près ou de loin dans mes études. Il s'agit particulièrement de :

- ❖ mes parents,
- ❖ mon mari,
- ❖ mes oncles et tantes,
- ❖ mes frères et sœurs
- ❖ tous mes amis.

## REMERCIEMENTS

*Louanges à Allah, le puissant, le majestueux, le protecteur sans qui nous n'aurions pas pu effectuer ce travail.*

J'adresse mes chaleureux et sincères remerciements :

- à mon tuteur de stage Dr Abdoul Aziz DIOUF, docteur PhD au Centre de suivi Ecologique, pour sa confiance, ses encouragements, ses efforts déployés à mon égard pour la réussite de ce travail ;
- à mon encadrant Pr Ismaïla COLY, Enseignant-Chercheur à l'UASZ, pour sa disponibilité, sa confiance, pour avoir proposé ma candidature et accepté de diriger ce mémoire malgré ses nombreuses responsabilités ;
- au Dr Simon TAUGOURDEAU, chercheur du CIRAD, pour sa diligence, sa disponibilité et ses collaborations précieuses ;
- au Pr Cheikh MBOW, Directeur du CSE pour avoir accepté de m'accueillir dans sa structure ;
- à l'Union Européenne, pour leur financement et leur accompagnement dans cette étude ;
- au CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement), à l'IRD (Institut de recherche pour le développement) et au PPSZ (Pôle Pastoralisme et Zones Sèches (PPZS) pour la formation et l'accompagnement durant l'étude ;
- à tous les professionnels et stagiaires du CSE, particulièrement, Mame Mor Mbodj, Mme Diarra Sylla et Mme Adama Lô pour leur accompagnement très précieux dans l'accomplissement de ce travail ;
- aux membres du Jury, qui ont pris la peine de corriger ce document et d'y apporter leurs précieuses suggestions ;
- à tout le corps professoral du département pour la formation de qualité qu'ils nous ont fait bénéficier ;

- à nos camarades de classes et promotionnaires de stage ;
- à tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce mémoire ;

## TABLE DES MATIERES

<b>DEDICACES</b> .....	<b>ii</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>iii</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b> .....	<b>x</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xii</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>3</b>
1.1. Carbone organique du sol.....	3
1.2. Principaux facteurs de la variation de carbone.....	4
1.2.1. Facteurs climatiques.....	4
1.2.2. La végétation.....	5
1.2.3. Qualité de la matière organique .....	5
1.2.4. Propriétés du sol.....	6
1.2.4.1. La texture .....	6
1.2.4.2. La porosité.....	7
1.2.4.3. Composition chimique du sol .....	7
1.3. Types de mesure du carbone du sol .....	8
<b>CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES</b> .....	<b>9</b>
2.1. Présentation de la zone d'étude .....	9
2.1.1. La région pastorale sableuse du Nord.....	9
2.1.2. La région pastorale sablonneuse du Sud.....	10
2.1.3. La région pastorale ferrugineuse.....	10
2.1.4. La région d'expansion agricole.....	10
2.1.5. La région de transition orientale .....	10
2.1.6. La région du Bouclier .....	11
2.1.7. La Casamance .....	11
2.2. Collecte des données .....	11

2.2.1.	Inventaire de la flore ligneuse et mesures dendrométriques .....	11
2.2.1.1.	Sites du CSE.....	11
2.2.1.2.	Sites du Sud.....	12
2.2.2.	Collecte des échantillons de sol .....	12
2.2.2.1.	Sites du CSE.....	12
2.2.2.2.	Sites du Sud.....	13
2.2.3.	Préparation du sol et passage au SPIR.....	14
2.2.4.	Acquisition d'images rasters de biomasse et de pluviométrie .....	14
2.3.	Traitement des données .....	15
2.3.1.	Calcul des paramètres ligneux et pédologiques .....	15
2.3.1.1.	Végétation ligneuse .....	15
2.3.1.2.	Carbone du sol .....	17
2.3.2.	Elaboration des modèles d'estimation du stock de carbone .....	17
<b>CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION .....</b>		<b>19</b>
3.1.	Analyse de la composition floristique des sites de l'étude.....	19
3.2.	Diversité de la végétation ligneuse dans les sites de l'étude.....	21
3.3.	Influence des caractéristiques de la végétation ligneuse et des facteurs pédologiques sur le stock de carbone du sol au des sites du CSE et du Sud.....	23
3.3.1.	Effet du couvert ligneux et de l'horizon de prélèvement du sol sur le stock de carbone du sol.....	23
3.3.1.1.	Sites du CSE.....	23
3.3.1.2.	Sites du Sud.....	24
3.3.2.	Effet de la diversité spécifique de la végétation ligneuse sur le stock de carbone du sol.....	24
3.3.2.1.	Sites du CSE.....	24
3.3.2.2.	Sites du Sud.....	25
3.3.3.	Effet des paramètres dendrométriques et structuraux de la végétation ligneuse sur le stock de carbone du sol.....	25
3.4.	Relation entre des variables étudiées et les sites .....	26
3.4.1.	Sites du CSE .....	26
3.4.2.	Sites du Sud.....	27
3.5.	Evaluation du stock de carbone avec les modèles Random Forest.....	29
3.6.	Discussion .....	31

3.6.1.	Relation entre diversité et stock de carbone du sol.....	31
3.6.2.	Variation de la teneur en carbone du sol en fonction de l’horizon, du houppier et des caractéristiques de la végétation ligneuse .....	32
3.6.3.	Variation du stock de carbone en fonction des facteurs environnementaux....	33
3.6.4.	Modèle d’évaluation du stock de carbone .....	34
	<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>34</b>
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>36</b>
	<b>ANNEXES .....</b>	<b>45</b>

## LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

<b>ACP</b>	Analyse en Composantes Principales
<b>Al</b>	Aluminium
<b>Arg</b>	Argile
<b>BOREAS</b>	Technologies avancées de gestion thermique pour les modules de batterie lithium
<b>Ca</b>	Calcium
<b>CaSSECS</b>	Séquestration de carbone et émissions de gaz à effet de serre dans les écosystèmes (agro) sylvopastoraux des états sahéliens
<b>CEC</b>	Capacité d'échange cationique
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de carbone
<b>COS</b>	Carbone organique du sol
<b>CSE</b>	Centre de Suivi Ecologique
<b>DEM</b>	Digital élévation model ou modèle numérique de terrain
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)
<b>Fe</b>	Fer
<b>Frag</b>	Fragments
<b>GES</b>	Gaz à effet de serre
<b>GIEC</b>	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
<b>HH</b>	Hors Houppier
<b>ITPS</b>	<i>Intergovernmental Technical Panel on Soils</i>
<b>LAMA</b>	Laboratoire des Moyens Analytiques
<b>Lat</b>	Latitude
<b>Long</b>	Longitude
<b>MIR</b>	Spectrométrie moyen infrarouge
<b>MO</b>	Matière organique
<b>MOS</b>	Matière organique du sol
<b>MSE</b>	Erreur quadratique moyenne
<b>Ntree</b>	Nombre d'arbres
<b>OCDE</b>	Organisation de Coopération et Développement Economique
<b>Pgc</b>	Petagrammes de carbone
<b>PNUD</b>	Programme des Nations Unies pour le Développement
<b>RRMSE</b>	Racine de l'erreur quadratique moyenne
<b>SH</b>	Sous houppier
<b>Spir</b>	Spectrométrie dans le proche infrarouge
<b>Tco</b>	Taux de couverture
<b>Wapoor</b>	<i>FAO Water Productivity</i>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1:</b> Localisation des sites d'étude selon les écorégions du Sénégal .....	9
<b>Figure 2:</b> Dispositif de prélèvement des échantillons sous houppier dans les sites du CSE	13
<b>Figure 3:</b> Dispositif de prélèvement des échantillons de sol dans les sites du Sud .....	14
<b>Figure 4:</b> Indices de diversité des sites du CSE .....	22
<b>Figure 5 :</b> Indices de diversité des sites du Sud .....	22
<b>Figure 6 :</b> Teneur carbone hors et sous houppier (CSE).....	23
<b>Figure 7 :</b> Teneur carbone en fonction de l'horizon (CSE).....	23
<b>Figure 8 :</b> Teneur carbone en fonction de l'horizon (Sud) .....	24
<b>Figure 9 :</b> Teneur carbone hors et sous houppier (Sud) .....	24
<b>Figure 10 :</b> ACP des variables et des sites du CSE.....	27
<b>Figure 11 :</b> Biplot entre les variables et les sites du Sud .....	28
<b>Figure 12 :</b> Répartition du stock de carbone Hors Houppier à l'échelle du Sénégal .....	29
<b>Figure 13 :</b> Répartition du stock de carbone sous houppier.....	30
<b>Figure 14:</b> Répartition du carbone total à l'échelle du Sénégal .....	31

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1:</b> Caractéristiques des variables étudiés .....	15
<b>Tableau 2:</b> Composition floristique des ligneux dans les sites du CSE et du Sud .....	19
<b>Tableau 3:</b> Corrélation entre le stock de carbone sous houppier des sites du CSE et les indices de diversité.....	25
<b>Tableau 4:</b> Corrélation entre le stock de carbone sous houppier des sites du Sud et les indices de diversité.....	25
<b>Tableau 5:</b> Corrélation entre les caractéristiques des ligneux et le stock de carbone sous houppier des sites du CSE.....	26
<b>Tableau 6:</b> Corrélation entre les caractéristiques des ligneux et le stock de carbone sous houppier des sites du Sud.....	26

## LISTE DES ANNEXES

<b>Annexe 1 :</b> Stocks de carbone par site.....	45
<b>Annexe 2:</b> Données facteurs environnementaux .....	46
<b>Annexe 3:</b> Corrélation entre les facteurs climatiques, les caractéristiques ligneuses et les stocks de carbone aux sites du CSE .....	47
<b>Annexe 4:</b> Corrélation entre les facteurs climatiques, les caractéristiques ligneuses et les stocks de carbone aux sites du Sud .....	48
<b>Annexe 5:</b> Liste des espèces recensées dans les sites du CSE et leur abondance .....	48
<b>Annexe 6:</b> Liste des espèces présentes aux sites du Sud et leur abondance.....	53
<b>Annexe 7:</b> Facteurs utilisés pour la modélisation.....	54
<b>Annexe 8 :</b> Exemple du code R de modélisation du stock de carbone sous-houppier avec l'algorithme Random Forest .....	55

## RESUME

Face aux effets négatifs du changement climatique dans le monde plus précisément dans la zone Soudano-Sahélienne, il devient primordial de trouver des méthodes de séquestration du carbone et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. La séquestration du carbone dans les sols et la biomasse terrestre est l'une des options énoncées dans l'article 3.4 du Protocole de Kyoto, mais très peu d'informations sont disponibles sur les capacités de stockage de carbone dans les sols. C'est dans ce contexte que cette étude s'est fixée comme objectif global de contribuer à une meilleure compréhension des déterminants la teneur en carbone du sol au Sénégal. Pour ce faire, 32 sites (24 sites du CSE et 8 sites du sud) ont été retenus à travers le Sénégal pour évaluer l'influence de la végétation ligneuse (sous et hors couvert ; densité de la végétation ligneuse), de l'horizon du sol (0-10cm et 10-20 cm) et de la zone climatique (zone soudano-sahélien ou sites de CSE et zone soudano-guinéenne ou sites du Sud) sur le stock de carbone sol. Les résultats obtenus ont montré des différences significatives entre les deux horizons ( $p$ -value=0,0006) pour les teneurs en carbone des sols des sites du CSE avec une teneur médiane de 4,4 mg/g pour l'horizon 0-10 cm et 3,2 mg/g pour l'horizon 10-20cm. Par contre ces teneurs ne présentent aucune variation significative en fonction des horizons ( $p$ -value=0,407) dans les sites du Sud. L'effet couverture ligneuse n'a aussi induit aucune variation significative de la teneur en carbone aussi bien pour les sites du CSE ( $p$ -value=0,072) que pour ceux du Sud ( $p$ -value=0,407), même si cette teneur est en valeur absolue plus élevée sous houppier. Les résultats ont montré aussi une bonne corrélation de la densité ligneuse (0,60) aux sites du CSE, de la pluviométrie (0,69) aux sites du Sud sur le stock du carbone du sol. La spatialisation du stock de carbone hors houppier, sous houppier et total révèle un gradient Nord-Sud avec une teneur en carbone plus grande dans la zone Sud du Sénégal.

**Mots clés :** Séquestration, Carbone, Sol, Houppier, Horizon, Spatialisation

## ABSTRACT

Faced with the negative effects of climate change in the world, more specifically in the Sudano-Sahelian zone, it is becoming essential to find methods of carbon sequestration and reduction of greenhouse gas emissions. Carbon sequestration in soils and terrestrial biomass is one of the options set out in Article 3.4 of the Kyoto Protocol, but very little information is available on the carbon storage capacities of soils. It is in this context that this study set itself the overall objective of contributing to a better understanding of the determinants of soil carbon content in Senegal. To do this, 32 sites (24 CSE sites and 8 southern sites) were selected across Senegal to assess the influence of woody vegetation (under and above cover; density of woody vegetation), soil horizon (0-10cm and 10-20cm) and climatic zone (Sudanese-Sahelian zone or CSE sites and Sudanese-Guinean zone or southern sites) on soil carbon stock. The results obtained showed significant differences between the two horizons ( $p$ -value=0.0006) for soil carbon contents of CSE sites with a median content of 4.4 mg/g for the 0-10 cm horizon and 3.2 mg/g for the 10-20cm horizon. On the other hand, these contents do not show any significant variation depending on the horizons ( $p$ -value=0.407) in the southern sites. The woody cover effect also did not induce any significant variation in carbon content for both CSE sites ( $p$ -value = 0.072) and those in the South ( $p$ -value = 0.407), even if this content is in absolute value higher under the crown. The results also showed a good correlation of woody density (0.60) at CSE sites, rainfall (0.69) at the Southern sites on soil carbon stock. The spatialization of the carbon stock outside the crown, under the crown and total reveals a North-South gradient with a higher carbon content in the southern zone of Senegal.

Keywords: Sequestration, Carbon, Soil, Crown, Horizon, Spatialization

## INTRODUCTION

Le réchauffement climatique constitue une réalité indéniable y compris dans les pays les moins industrialisés. Malgré leur faible contribution, aux émissions de gaz à effet de serre (GES), ils restent cependant les plus vulnérables face aux conséquences néfastes des changements climatiques (ONU, 2022). Le changement climatique engendre d'importantes modifications environnementales, à l'image des sécheresses dont la récurrence accélère le déclin des forêts dans le Sahel ouest-africain (Grouzis et Albergel, 1989 ; Higgins et *al.*, 1999 ; Ouédraogo et Thiombiano, 2012 ; Belem et *al.*, 2017 ; Ouedraogo et *al.*, 2019), réduit le couvert végétal et les rendements agricoles, et favorise l'extension des zones dénudées (Bambara et *al.*, 2013). Cet amenuisement des ressources naturelles affecte surtout la survie des populations des pays les moins industrialisés et les expose à l'insécurité alimentaire et à la pauvreté. En outre, vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, l'élévation anticipée du niveau de la mer affectera les basses terres littorales fortement peuplées. Et le coût de l'adaptation pourrait représenter 5 à 10 % du PIB de ces populations, voire plus (GIEC, 2007). De ce fait, l'intensification des efforts de lutte contre les changements climatiques devra se faire dans une synergie d'actions aux niveaux international, national, régional et local (PNUD, 2008 ; OCDE, 2009). Ainsi, la séquestration du carbone (C) atmosphérique dans les écosystèmes terrestres est devenue un enjeu majeur dans le contexte global de réduction des émissions de gaz à effet de serre et implique différents pools entre autres la biomasse aérienne, la biomasse souterraine, le bois morts, la litière et le carbone du sol. Le sol représente un très grand réservoir de carbone, avec des estimations de l'ordre de 1500 pétagrammes de carbone (PgC) dans le premier mètre de sol (Feller et Bernoux, 2008 ; Grinand et al, 2009), dont 26 % sont stockés dans les sols tropicaux (Batjes et Sombroek, 1997). Le sol contient ainsi environ trois fois plus de carbone que la végétation (~ 610 PgC) et environ deux fois plus que l'atmosphère (~740 PgC) (Grinand et al, 2009). Le potentiel de séquestration du carbone dans le sol, notamment dans les régions tropicales, représente donc un grand intérêt (Robert, 2002). Environ 68 % du carbone terrestre en Afrique subsaharienne se trouveraient dans les sols (Henry et *al.*, 2009 ; Henry et *al.*, 2020). Le sol a aussi une influence sur le climat en fonction de son état et de son utilisation. Cette influence est déterminée principalement par les flux de carbone et la fonction de puits de carbone (URI et *al.*, 2019). Ainsi, le sol joue un rôle crucial dans le cycle du carbone, bien que sa caractérisation demeure complexe en raison de sa grande variabilité et des nombreux facteurs régulant la fraction organique du sol (Bernoux et *al.*, 2002). Les principaux facteurs influençant l'évolution de la matière organique concernent la végétation (apport de résidus, composition de la plante), puis les facteurs climatiques

(température/conditions d'humidité) et les propriétés des sols (texture, teneur en argile, minéralogie, acidité) (FAO 2002). Les facteurs qui influencent le contenu en matière organique du sol peuvent être naturels (climat et type de végétation) et anthropiques (utilisation et gestion du sol). Ce contenu dépend à la fois de la restitution de la biomasse au sol, des apports exogènes ainsi que des taux de minéralisation et d'humification de la matière organique. Ces derniers sont aussi fonction, entre autres, de la nature des sols et de certains paramètres physicochimiques (température, humidité, pH, etc.) (Bernoux et *al.*, 2013). C'est dans cette optique que le projet CaSSECS s'intéresse à l'influence des formations ligneuses, des facteurs environnementaux et quelques caractéristiques des sols sur la capacité de séquestration du carbone du sol.—Ce projet vise à améliorer l'évaluation du bilan carbone des systèmes agropastoraux, permettant ainsi une meilleure quantification de leur impact sur le changement climatique. De plus, il vise à élaborer des politiques d'élevage adaptées au contexte du Sahel. Ainsi, cette étude s'inscrivant dans ce projet a pour objectif global de contribuer à une meilleure compréhension des déterminants de la teneur en carbone du sol au Sénégal. Plus spécifiquement, il s'agit :

- ✓ d'évaluer l'influence de la végétation ligneuse et des facteurs pédoclimatiques sur le stock de carbone du sol ;
- ✓ de comparer la variation spatiale et le stock de carbone du sol entre les zones Soudano-sahélienne (sites du CSE) et soudano-guinéenne (sites du Sud) du Sénégal ;
- ✓ de spatialiser le stock de carbone du sol à l'échelle du Sénégal ;

Ce mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre présente la synthèse bibliographique, le deuxième aborde le matériel et les méthodes utilisées et le troisième présente les résultats et leur discussion avant la conclusion.

# CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

## 1.1. Carbone organique du sol

Les stocks de carbone contenus dans les sols correspondent à la différence entre la quantité de matière organique incorporée au sol et les pertes de CO<sub>2</sub> par la minéralisation du carbone organique et le carbone organique dissous. Depuis plus d'un siècle, les études relatives aux stocks de carbone dans les sols soutiennent que les concentrations de carbone sont influencées par la dynamique de la végétation, principalement la production de biomasse et la qualité de la matière organique (Jobbagy et Jackson, 2000 ; Banville, 2009). En plus d'être influencée par les apports de biomasse au sol, l'accumulation du carbone serait liée au climat, au type de sol, aux conditions d'humidité ainsi qu'à la qualité du substrat organique (Banville, 2009; Paul et al., 2002; Lai, 2005). On estime le contenu de carbone organique du sol à environ 1500 PgC entre 0 et 1 mètre de profondeur. Cela représente plus de carbone que ce qui est actuellement contenu dans l'atmosphère (environ 800 PgC) et dans la végétation terrestre (500 PgC) réunis (Lefèvre et al., 2017). Cette quantité élevée de carbone organique n'est pas statique, mais évolue en permanence au travers de cycles entre les différentes réserves de carbone, sous des formes moléculaires diverses (Kane, 2015). Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et le méthane (CH<sub>4</sub>) sont les principaux gaz atmosphériques contenant du carbone. Dans le sol, les organismes autotrophes (principalement les plantes), ainsi que les microbes photo et semi-autotrophes synthétisent de la matière organique à partir du CO<sub>2</sub> provenant de l'atmosphère. Le matériel organique mort (principalement sous forme de résidus de plantes ou exsudats) est incorporé au sol par le biais de la faune du sol. Au travers de la transformation du matériel organique par les micro-organismes hétérotrophes, du carbone supplémentaire est intégré au sol. De ce processus de transformation du matériel organique, résulte une mixture biogéochimique complexe composée de la litière des végétaux et de produits de la décomposition microbienne à différents degrés de décomposition (Von Lützow et al., 2006; Lefèvre et al., 2017). Ces produits peuvent être associés aux minéraux du sol ou bloqués au sein d'agrégats, permettant ainsi la persistance du carbone organique dans le sol pendant des dizaines, des centaines, voire des milliers d'années (Schmidt et al., 2011 ; Lefèvre 2017). Lorsque la matière organique du sol (MOS) est décomposée (ou minéralisée) par les micro-organismes, du CO<sub>2</sub> est émis en retour dans l'atmosphère. Les exsudats racinaires tels que l'acide oxalique, qui libère des composés organiques à partir d'associations minérales protectrices peuvent aussi entraîner des pertes de carbone (Keiluweit et al., 2015). Finalement, une partie du carbone du sol est aussi exportée vers les rivières et océans sous la forme de carbone organique dissous ou dans le matériel

d'érosion. En principe, la quantité de carbone organique stockée dans un sol donné dépend d'un équilibre entre la quantité de carbone qui entre dans le sol et celle qui en sort, comme résultat de la minéralisation microbienne et, dans de moindres proportions, celle qui est lessivée sous forme de carbone organique dissous. A l'échelle locale, du paysage ou de la région, l'érosion ou des dépôts sur le sol peuvent aussi entraîner une perte ou un gain de carbone, amenant une redistribution du carbone dans le sol. La quantité de carbone organique du sol stocké est donc principalement contrôlée par la gestion de la quantité et du type de résidus organiques qui entrent dans le sol, c'est-à-dire les apports de carbone organique dans le système sol et par la minimisation des pertes du carbone du sol (Lefèvre *et al.*, 2017).

## **1.2. Principaux facteurs de la variation de carbone**

Par leur influence sur les taux d'accumulation et de perte du carbone, plusieurs facteurs biophysiques participent à la variabilité spatiale des stocks de carbone. En effet, les interactions entre le climat, les perturbations naturelles, la texture et l'humidité des sols, le type de végétation, la disponibilité en nutriments et la topographie sont fortement corrélées avec les concentrations de carbone des sols (Parton *et al.*, 1987; Banfield *et al.*, 2002).

### **1.2.1. Facteurs climatiques**

À l'échelle globale, les précipitations et la température influencent les stocks de carbone dans les sols en raison de leurs effets sur la composition et la productivité végétale, sur la pédogenèse ainsi que sur la décomposition de la matière organique (Banville, 2009). Malhi *et al.* (1999) ont reconnu la température comme étant le facteur conditionnant les pertes et les gains de carbone dans les forêts à l'échelle globale alors que dans une étude plus récente, Lai (2005) a inclus les précipitations, la luminosité, le potentiel d'évapotranspiration et le ratio entre les précipitations et le potentiel d'évapotranspiration dans le bilan. L'incidence la plus significative de la température sur les stocks de carbone se rapporterait à son influence sur les taux de respiration hétérotrophe. En effet, une augmentation des températures à la surface des sols combinée à un taux d'humidité optimal, peut amener une hausse des pertes de carbone sous forme de CO<sup>2</sup>. Certaines études ont tenté de démontrer qu'à l'échelle globale, les taux de décomposition dans la couche organique ne seraient pas dépendants de la température (Giardina et Ryan, 2000). Malgré ces divergences, il est toutefois reconnu que la taille des pools de carbone augmente avec la diminution de la température annuelle moyenne et l'augmentation des pluies (Jobbagy et Jackson, 2000).

### **1.2.2. La végétation**

Les stocks de carbone varient significativement selon la végétation (Banville, 2009). L'âge des peuplements et leur distribution de classe sont des facteurs importants à considérer dans l'estimation des stocks de carbone à l'échelle du paysage (Peltoniemi *et al.*, 2004). Falloon *et al.* (1998) et Gaudinski *et al.* (2000) ont mentionné que la production primaire de jeunes forêts était largement supérieure à la décomposition, entraînant une séquestration nette du carbone dans les premiers stades de développement tandis que Harmon *et al.* (2001) ont démontré que la forêt mature continuait à séquestrer du carbone dans les débris ligneux et la matière organique du sol même lorsque son stade d'équilibre était atteint. Dans le cadre du projet Technologies avancées de gestion thermique pour les modules de batterie lithium (BOREAS), les résultats ont montré que les émissions de CO<sup>2</sup> dans les peuplements en régénération après feu étaient similaires à celles enregistrées dans les peuplements matures (Amiro *et al.*, 2003 ; Banville 2009) indiquant aucune différenciation de séquestration selon l'âge des peuplements. Le type de végétation influence également les stocks de carbone dans les sols par la production de litière et la vitesse à laquelle se décomposent les composés organiques des différentes espèces (Gower *et al.*, 1997 ; Quideau *et al.*, 2001 ; Ndzai, 2020).

### **1.2.3. Qualité de la matière organique**

La composition chimique de la matière organique (MO) des sols influence la dynamique du carbone et des nutriments par la rapidité avec laquelle se décomposent les substances qui la constitue (Paré et Bergeron, 1996 ; Ågren et Bosatta, 1996 ; Berg *et al.*, 2001). La matière organique provient principalement des apports de la végétation et par conséquent, la qualité varie selon les espèces végétales. La composition végétale est donc la principale responsable de la différenciation des propriétés chimiques de la matière organique contenue dans les sols (Aerts et Chapin, 2000). Une MO de bonne qualité est plus rapidement éliminée par les micro-organismes et à un taux de décomposition plus élevé. La concentration en lignine, le ratio lignine/azote ainsi que le ratio carbone/azote sont considérés comme d'importants indicateurs du taux de décomposition (Schimel *et al.*, 1994) et sont utilisés pour déterminer la qualité de la matière organique. La matière organique de bonne qualité aura tendance à se décomposer facilement (Banville, 2009). Elle est principalement composée de matériel labile comme les acides aminés et les sucres et contient peu de matériel récalcitrant comme la lignine (Gobat *et al.*, 2003), on pense par exemple à la litière des espèces décidues. Les formes récalcitrantes de

carbone organique sont bénéfiques dans le processus de séquestration puisqu'elles possèdent un long temps de résidence dans les sols. Par exemple, la décomposition de la lignine produit des substances humiques qui vont intensifier la séquestration du carbone dans les sols à travers la formation de complexes avec les acides aminés et les enzymes. Les tannins et les polyphénols peuvent aussi réduire le taux de décomposition puisqu'ils offrent une protection contre les herbivores et autres pathogènes. Ces propriétés chimiques peuvent donc réduire ou faciliter l'activité bactérienne dans les sols et conséquemment la décomposition de la matière organique (Flanagan et Van Cleve, 1983; Gobat et *al.*, 2003 ; Banville 2009). La fraction labile est minéralisée plus rapidement et le carbone organique retourne à l'atmosphère sous forme de CO<sup>2</sup>, tandis que le matériel récalcitrant, plus stable, est stocké dans les sols pour une plus ou moins longue période (Raich et Tufekcioglu, 2000 ; Banville 2009). La qualité de la matière organique permet donc d'estimer le turnover du carbone (Ågren et Bosatta, 1996). La qualité de la litière peut ne pas avoir d'effet sur la qualité du carbone retrouvé dans les sols selon Giardina et *al.* (2001). Plus récemment Hobbie et *al.* (2007) avançaient que les espèces arborescentes pouvaient influencer le comportement de la matière organique dans les sols minéraux par leur influence sur les cations plutôt que par la composition chimique des détritiques et la récalcitrance de leurs composés (Adjila, 2017).

#### **1.2.4. Propriétés du sol**

##### **1.2.4.1. La texture**

Le degré de protection physique du carbone organique des sols peut être attribuable à la texture des sols minéraux, à la capacité au champ ainsi qu'à la porosité (Baldock et Skjemstad, 2000). Cependant, les études portant sur le rôle de protection de la MO par les particules fines ne sont pas unanimes (Matus et al, 2008). Les travaux d'Amato et Ladd (1992) ont démontré le rôle déterminant de la texture des sols dans l'accumulation du carbone. Une augmentation du contenu en argile correspondrait à une diminution de la respiration hétérotrophe en raison du potentiel de protection des particules fines (Banville 2009). La matière organique est protégée par la floculation des argiles, l'adsorption des particules minérales autour des particules organiques ou par la formation d'agrégats (micro ou macro). Les agrégats favorisent une plus grande stabilité du carbone du fait qu'ils établissent une barrière physique entre les composés organiques et les organismes décomposeurs. C'est pour cette raison qu'ils contiendraient davantage de carbone récalcitrant (Plante et McGill, 2002). Cette capacité de protection est toutefois contestée notamment par Balesdent et *al.* (1998) qui ont démontré que les particules

de silts et d'argiles pouvaient autant être associées à des fractions résistantes du carbone qu'à des fractions labiles (Banville, 2009). Six et *al.* (2000) ont également trouvé plus de carbone et du carbone plus ancien dans les sols à texture fines du fait qu'il est protégé de la minéralisation pendant de nombreuses années. Dans une étude, Plante et *al.* (2006) ont mentionné l'existence d'une interaction entre les mécanismes de protection physiques et biochimiques permettant de préserver le carbone organique dans la fraction minérale argileuse et la difficulté de déterminer le carbone biochimiquement récalcitrant (lignine, tannins) de celui physiquement protégé. Dans leur étude récente, Matus et *al.* (2008) ont mis en évidence la limite du potentiel de protection du carbone séquestré par les particules fines et mentionné qu'en conditions de saturation, les nouveaux apports de matière organique ne pouvaient être protégés par les mécanismes de protection physique des particules d'argiles et de limons. La relation entre le carbone stocké dans les sols et la texture des sols minéraux n'est donc pas encore complètement élucidée.

#### **1.2.4.2. La porosité**

La porosité du sol a aussi été retenue comme jouant un rôle déterminant dans la stabilité du carbone (Schjonning et *al.*, 1999). L'architecture des sols minéraux réfère à un arrangement de particules minérales et de pores. Le carbone organique serait principalement situé dans ces pores sous la forme de molécules adsorbées à la surface des particules minérales. La taille des pores va donc influencer la capacité des organismes décomposeurs à atteindre les particules organiques (Sana, 2018). Les sols argileux à faible porosité posséderaient donc un fort potentiel de protection de la matière organique face à la décomposition. La porosité du sol influence aussi le contenu d'eau volumétrique ainsi que la disponibilité en oxygène. Ces conditions anaérobiques réduisent l'activité des décomposeurs (Schjonning et *al.*, 1999 ; Thomsen et *al.*, 1999).

#### **1.2.4.3. Composition chimique du sol**

Les nutriments contenus dans les sols influencent aussi la décomposition de la matière organique puisque ces derniers stimulent l'activité des organismes décomposeurs. Une concentration élevée en nutriments favorise la productivité végétale et les retombées de matière organique au sol. Une comparaison entre différents types de sols minéraux a démontré aussi que la présence de cations multivalents comme le Calcium (Ca), l'Aluminium (Al) et le Fer (Fe) favorisait l'accumulation de carbone organique en agissant comme agent liant entre les particules de carbone dans les sols (Sombroek et *al.*, 1993 ; Banville 2009).

Les propriétés physico-chimiques des sols interagissent donc avec les facteurs climatiques et l'humidité pour augmenter ou réduire les taux de décomposition de la matière organique et incidemment l'accumulation de carbone dans les sols.

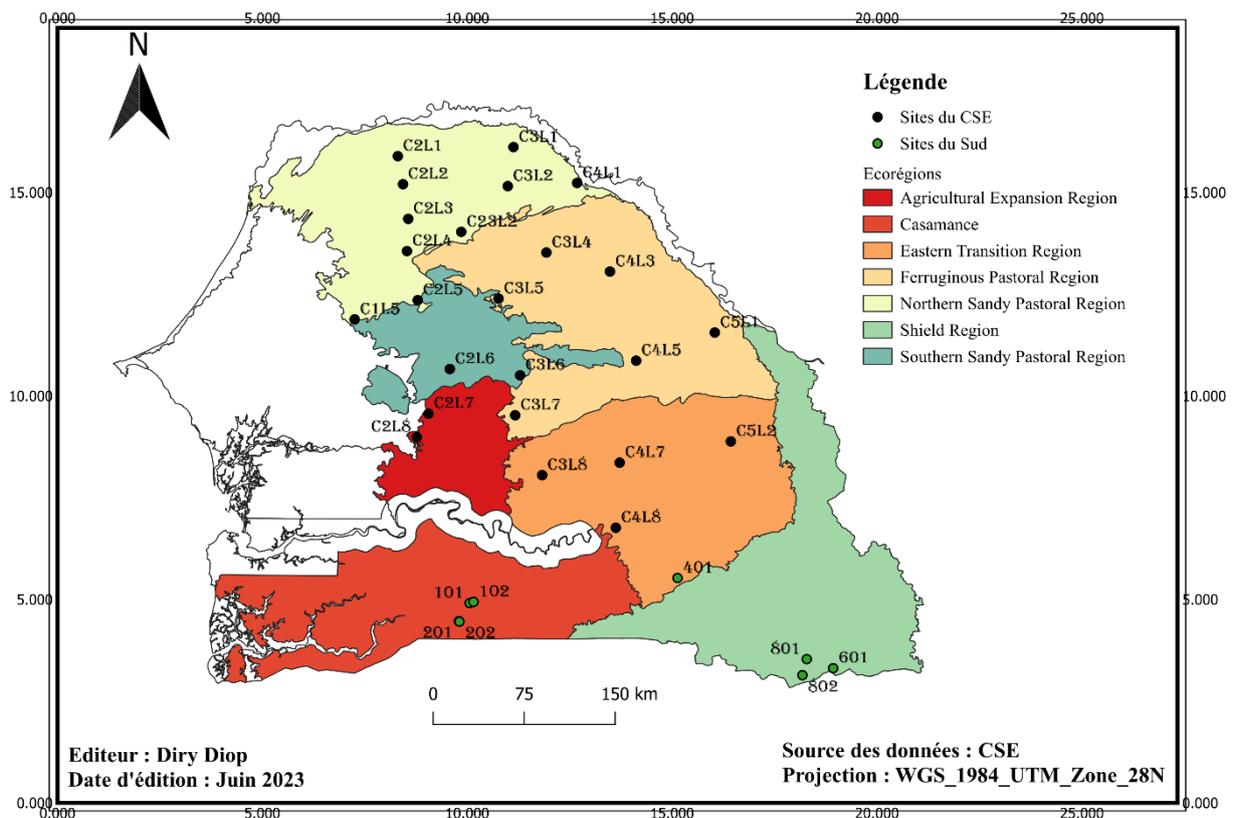
### **1.3. Types de mesure du carbone du sol**

Pour faciliter et assurer un suivi régulier, les stocks de carbone organique du sol (COS) devraient être mesurés grâce à une méthode peu coûteuse et pouvant couvrir une grande diversité de sols. Cependant, analyser le COS avec une méthode pouvant être appliquée dans des circonstances diverses représente un défi puisque le COS n'est pas distribué de manière égale sur de vastes surfaces, profondeurs, types de sols et emplacements de terrain. Par conséquent, plusieurs méthodes pour mesurer et rendre compte des dynamiques du COS ont été développées. A ce jour, il n'existe pas d'approche standardisée pour mesurer la concentration totale de carbone (Lorenz et Lal, 2016, Lefèvre *et al.*, 2017). Les méthodes innovantes qui peuvent caractériser rapidement et de manière économique le COS, comme la spectroscopie par réflectance dans le visible et proche infrarouge (Vis-NIR) et dans l'infrarouge moyen (MIR) ont produit de bons résultats pour la prédiction de la teneur en COS (Viscarra Rossel *et al.*, 2006; Miltz et Don, 2012, Lefèvre *et al.*, 2017). Les méthodes développées dans le passé, comme l'oxydation par voie humide ou à sec, sont toujours régulièrement utilisées, surtout dans les pays en voie de développement. Il est recommandé d'utiliser la combustion à sec pour la mesure du COS, plutôt que la méthode plus commune, et moins chère de Walkley et Black, car du fait d'une oxydation incomplète, cette dernière nécessite l'utilisation de facteurs correctifs. Cependant, la combustion à sec a des coûts d'analyse élevés et nécessite une grande préparation et la destruction d'échantillons. L'application de cette méthode analytique dans les laboratoires de référence a été jugée nécessaire pour mettre en place de grands centres de documents spectraux et développer des modèles de calibration précis (Shepherd et Walsh, 2002, Lefèvre *et al.*, 2017).

## CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES

### 2.1. Présentation de la zone d'étude

L'étude a été menée sur 32 sites dont 24 sites de contrôle au sol du Centre de Suivi Ecologique du Sénégal (CSE) localisés dans la zone soudano-sahélienne et 8 sites complémentaires du sud du Sénégal dans la zone soudano-guinéenne. Ces sites sont situés dans 7 écorégions selon le découpage proposé par Tappan *et al.* (2004) (figure 1). Ce sont la région pastorale sableuse du Nord, la région pastorale sableuse du Sud, la région pastorale ferrugineuse (ou latéritique), la région d'expansion agricole, la région de transition orientale, la région Casamançaise et la région du Bouclier.



**Figure 1:** Localisation des sites d'étude selon les écorégions du Sénégal

#### 2.1.1. La région pastorale sableuse du Nord

Cette région, également connue sous le nom de Ferlo sableux, constitue le cœur de la zone sylvopastorale du Sénégal. Elle couvre environ 24 763km<sup>2</sup> de superficie. Elle présente les caractéristiques typiques de la zone climatique sahélienne centrale, et est caractérisée par une saison des pluies courte et irrégulière (150 à 300mm de pluie), des prairies ouvertes avec des arbustes et des arbres épars une prédominance du genre *Acacia sp* (N'goran, 2018). Les sols

sableux rouge-brun et sols sableux tropicaux ferrugineux y sont prédominants. Elle recouvre les sites C2L1, C2L2, C2L3, C2L4, C2L5, C3L1, C3L2, C4L1, C23L2.

### **2.1.2. La région pastorale sablonneuse du Sud**

Cette région couvrant une superficie de 10 852 km<sup>2</sup>, partage de nombreuses caractéristiques géomorphologiques et pédologiques de la région pastorale sableuse du Nord, mais s'en distingue par des précipitations nettement plus élevées (300 - 500 mm). La végétation prédominante est celle des arbustes et de la savane arborée avec moins d'espèces d'*acacias* et une prédominance de la famille des combrétacées. Les sites de l'étude représentés dans cette zone sont C2L6 et C3L6.

### **2.1.3. La région pastorale ferrugineuse**

Elle recouvre une superficie de 30 908 km<sup>2</sup> et est caractérisée par un climat de type continental sahélien et sahélo soudanien avec une pluviométrie allant de 300 à 600 mm. Les sols sont de type tropical ferrugineux peu profonds, limoneux, graveleux à lithosols et ferrugineux tropicaux lessivés dans les vallées. La formation ligneuse est constituée de savanes arbustives et de brousses, souvent relativement denses avec une forte présence de *Guiera Senegalensis* J.F. Gmel dans la zone. Les sites qui y sont présents sont C3L4, C3L5, C3L7, C4L3, C4L5 et C3L7.

### **2.1.4. La région d'expansion agricole**

La région d'expansion agricole (8 436 km<sup>2</sup>) est comme son nom l'indique une région où l'expansion agricole s'est faite au détriment de l'élevage. Ses larges vallées aux sols profonds, sablonneux à limoneux, conviennent à de nombreuses variétés de cultures. Elle est caractérisée par un climat de type Soudanien continental avec une pluviométrie de 500 à 600 mm. Elle est constituée d'arbustes et arbres dégradés fortement dominés par l'espèce *Guiera senegalensis* *Guiera Senegalensis* J.F. Gmel (Tappan *et al.*, 2004). Les sites C2L8 et C2L7 sont situés dans cette zone.

### **2.1.5. La région de transition orientale**

La région de transition orientale couvre une superficie de 27 869 km<sup>2</sup> et est biologiquement et physiquement semblable à la région d'expansion agricole. Elle se différencie de celle-ci par un peuplement démographique moins dense et une prédominance des plateaux latéritiques dans la région. La région a un climat soudanien continental et des précipitations allant de 500 à 800

mm. Les sols sont limoneux, graveleux peu profonds sur latérite en plateau. Elle comprend les sites C3L8, C4L7, C4L8, S401.

#### **2.1.6. La région du Bouclier**

La région du Bouclier possède un climat soudanien continental et soudano-guinéen avec des précipitations entre 600 - 1100 mm. Une grande partie de cette région est sous la protection du Parc National du Niokolo-Koba qui contient certaines des flores et faunes de type soudanien les plus intactes d'Afrique (Tappan *et al.*, 2004). La diversité floristique reste élevée, préservant bon nombre des ressources génétiques qui se perdent dans d'autres régions du Sénégal. Elle recouvre les sites S801, S802, S602.

#### **2.1.7. La Casamance**

« La Verte Casamance » d'une superficie de 24 540 km<sup>2</sup> est bien connue pour sa verdure tropicale, ses paysages forestiers luxuriants, ses vallées bordées de palmeraies à huile et ses rizières. Géographiquement, la région se distingue des autres régions par un climat soudano-guinéen, la combinaison de fortes précipitations saisonnières (800 – 1400 mm), d'un système de drainage bien développé, de sols ferrallitiques et hydromorphes au niveau des vallées. La formation ligneuse est constituée essentiellement de savanes, zones boisées, prairies sur bowe, forêts riveraines et galeries le long des vallées avec une flore dense et riche. Les sites S101, S102, S201 et S202 sont localisés dans cette zone.

### **2.2. Collecte des données**

Elle a consisté à effectuer des inventaires des ligneux, des mesures dendrométriques et un échantillonnage du sol selon différents profondeurs hors et sous houppier et un téléchargement d'images rasters de la biomasse et de la pluviométrie. Cette collecte de données a été réalisée au mois de novembre 2021 pour les sites du Sud et aux mois d'avril et mai 2022 pour les sites du CSE.

#### **2.2.1. Inventaire de la flore ligneuse et mesures dendrométriques**

Sur la base de l'accessibilité du terrain et selon les sites (sites du CSE ou sites du Sud), différents dispositifs ont été installés.

##### **2.2.1.1. Sites du CSE**

Les vols de drone ont été effectués sur un transect de 1000 m de long et environ 80 m de large afin d'obtenir des images de terrain, le recouvrement et l'altitude. Sur le même transect de 1km de long, des placettes circulaires équidistantes de 200 m ont été installées. Dans ces placettes de rayon 19,95 m ou 28,22 m (choisies selon la densité ligneuse), la flore ligneuse (arbres et

arbustes) a été totalement inventoriée avec une prise des coordonnées de chaque individu rencontré. Ainsi, en plus de l'inventaire de toutes les espèces rencontrées, pour chaque individu, le diamètre moyen (Nord-Sud et Est-Ouest) de la canopée a été mesuré à l'aide d'un ruban métrique, la hauteur des individus à l'aide d'un vertex (Haglof) et la circonférence à la base des arbres/arbustes à l'aide d'un ruban-mètre. Toutes les régénérations (individus de circonférence inférieure à 10 cm selon Akpo et Grouzis, 1996) ont également été recensées tout en distinguant, par espèce, les plantules (individus de hauteur inférieure à 30 cm) et les jeunes plants (hauteur supérieure à 30 cm), de même que les individus morts sur pieds ou coupés. Pour la distinction entre jeune plant et plantule selon la hauteur, l'étude s'est basée sur les travaux de Dendoncker et Vincke, (2020).

#### **2.2.1.2. Sites du Sud**

Des vols de drone ont été également effectués sur 8 sites ayant chacun une parcelle d'échantillonnage carrée de 50m ou 30m de côté selon la densité de la végétation afin d'obtenir des images de terrain, le recouvrement et l'altitude. Après avoir identifié une placette pour chaque site, un inventaire complet des arbres et arbustes a été effectué dans chaque carré et les coordonnées de chaque individu rencontré ont été relevées. Et pour chaque individu, comme pour les sites du CSE, le diamètre moyen (Nord-Sud et Est-Ouest) de la canopée et la circonférence à la base des arbres/arbustes ont été mesurés à l'aide d'un ruban-mètre et la hauteur des individus à l'aide d'un vertex (Haglof).

#### **2.2.2. Collecte des échantillons de sol**

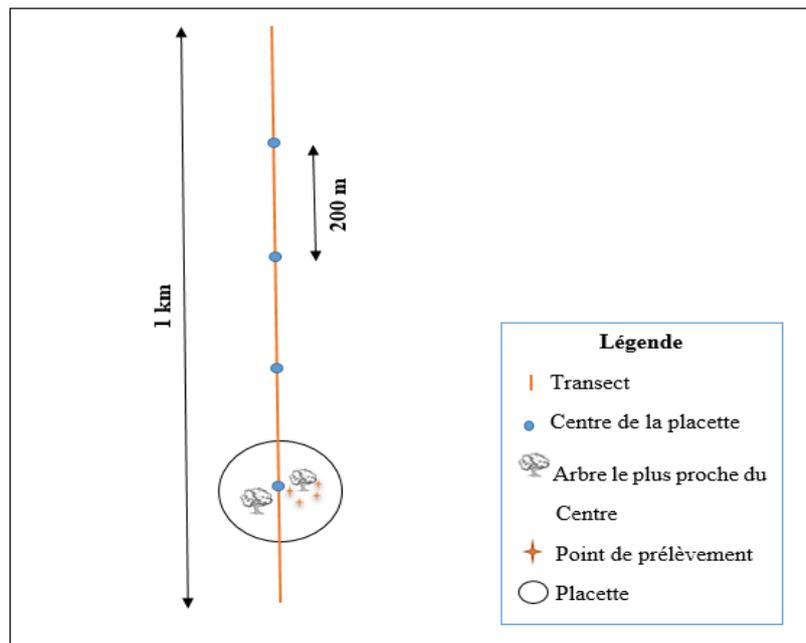
La collecte des échantillons de sol a été faite selon des dispositifs nettement différents en fonction des sites du CSE et ceux du Sud. Un nombre de 384 échantillons de sol a été collecté pour les sites du CSE contre 146 échantillons de sol pour les sites du Sud.

##### **2.2.2.1. Sites du CSE**

Au niveau des placettes circulaires distantes de 200 m les unes des autres sur un transect de 1km, deux arbres ayant une hauteur supérieure à 3m sont choisis par placette selon leur proximité au centre du cercle, de part et d'autre du diamètre de la placette. Pour obtenir les échantillons de sol sous houppier, 4 prélèvements de sol ont été effectués sous l'arbre et par horizon de prélèvement (0-10 cm et 10-30 cm) suivant les quatre orientations géographiques (Nord, Sud, Est, Ouest) (Figure 2).

Les prélèvements hors-houppier sont effectués à au moins 10 m des 2 arbres cités précédemment au niveau des 4 orientations géographiques (Nord, Sud, Est, Ouest) afin d'éviter

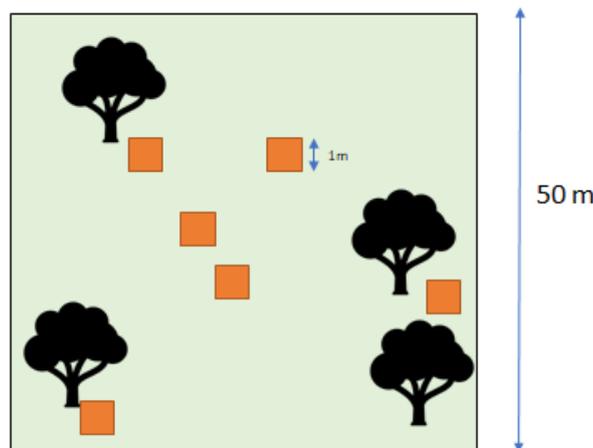
l'effet du couvert arboré en tenant compte des 2 profondeurs à chaque prélèvement. La densité apparente est aussi déterminée à l'aide d'un cylindre de densité de  $100\text{g/cm}^3$ . Les prélèvements des échantillons de sol ont été effectués à l'aide d'une truelle et d'une tarière puis mélangés dans des bassines pour obtenir un échantillon composite par profondeur et par arbre pour chacun des sites.



**Figure 2:** Dispositif de prélèvement des échantillons sous houppier dans les sites du CSE

#### 2.2.2.2. Sites du Sud

Les profondeurs de prélèvement des échantillons de sol plus ou moins similaires (0 à 10 cm et de 10 à 30 cm) à celles des sites du CSE ont également été considérées dans les sites du Sud. Dans chaque parcelle de 30 m ou 50 m de côté, trois placettes de  $1\text{m}^2$  sont choisies aléatoirement sous les arbres et 3 autres hors houppier (Figure 3). La densité apparente est aussi déterminée à l'aide d'un cylindre de densité de  $100\text{g/cm}^3$ . Les échantillons de sol sont prélevés à l'aide d'une truelle et d'une tarière. Une fois les prélèvements hors-houppier et sous-houppier obtenus, ils ont été mélangés séparément dans des bassines pour obtenir un échantillon composite par profondeur et par arbre pour chacun des sites du Sud.



**Figure 3:** Dispositif de prélèvement des échantillons de sol dans les sites du Sud

### 2.2.3. Préparation du sol et passage au SPIR

Les échantillons de sol obtenus sont séchés à l'air libre puis tamisés avec un tamis de maille 2mm. Par la suite, le classement, l'aliquotage (mise en tube du sable) et l'étiquetage des échantillons de sol ont été effectués. Les échantillons ont ensuite été scannés en utilisant le Labspec ASD portable qui est un spectromètre infrarouge permettant d'acquérir des spectres à partir du sol dans le but de prédire le teneur en carbone. La réflectance diffuse est mesurée dans la gamme spectrale de 350 à 2500 nm à 1 nm d'intervalles. Les données spectrales sont enregistrées sous forme d'absorbance ( $A$ ) selon l'équation :

$A = \log 1/R$  où  $R$  est la réflectance

Les échantillons de sol complémentaires ayant une signature spectrale différente sont envoyés au laboratoire des moyens analytiques de Dakar (LAMA) pour des analyses chimiques.

### 2.2.4. Acquisition d'images rasters de biomasse et de pluviométrie

Les images rasters de la biomasse et de pluviométrie de l'année 2022 ont été téléchargées à partir du site Wapor de la FAO ([https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR\\_2/1](https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1)) à une résolution de 250 m afin d'obtenir les moyennes de biomasses et de pluies entre 2018 et 2022. Les images des paramètres physico-chimiques du sol ont été téléchargés à partir du site Soilgrids (<https://soilgrids.org/>) avec une résolution de 250 m. Les images DEM qui représente l'élévation de terrain ont été obtenues via le site dwtkns (<https://dwtkns.com/srtm30m/>) avec une résolution de 30m. Une uniformisation de la résolution spatiale des images à 100m, à

l'image de la couche raster du taux de couverture ligneuse, a été réalisée pour faciliter la modélisation du stock de carbone du sol.

### 2.3. Traitement des données

La saisie des données a été réalisée à l'aide du tableur Excel. Les analyses statistiques des résultats de la végétation ligneuse et du sol, les traitements des images et la cartographie du stock de carbone sont effectués avec les logiciel R version 2023.06.1-524 et QGIS version 3.16.16. Le tableau ci-dessous représente les différents variables utilisés (Tableau 1).

**Tableau 1:** Caractéristiques des variables étudiés

Variable raster	Résolution d'origine	Source
DEM	30m	<a href="https://dwtkns.com/srtm30m/">https://dwtkns.com/srtm30m/</a>
Fragment	250m	<a href="https://soilgrids.org/">https://soilgrids.org/</a>
pH	250m	<a href="https://soilgrids.org/">https://soilgrids.org/</a>
Pluviométrie	250m	<a href="https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1">https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1</a>
Texture	250m	<a href="https://soilgrids.org/">https://soilgrids.org/</a>
Biomasse	250m	<a href="https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1">https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1</a>
Argile	250m	<a href="https://soilgrids.org/">https://soilgrids.org/</a>
Capacité échange cationique	250m	<a href="https://soilgrids.org/">https://soilgrids.org/</a>
Taux de couverture arborée	100m	Brandt et al. 2020

#### 2.3.1. Calcul des paramètres ligneux et pédologiques

##### 2.3.1.1. Végétation ligneuse

Cinq paramètres de la végétation ligneuse sont considérés dans cette étude : la richesse spécifique (RS), la densité réelle (Dr), le couvert ligneux (C), l'indice de diversité de Shannon-Weaver (H') et l'indice de régularité (E). Les formules ci-après ont été utilisées pour procéder au calcul des différents paramètres :

- La richesse spécifique a été évaluée à partir de la richesse spécifique totale et la richesse spécifique moyenne. La richesse spécifique totale (RS) est le nombre total d'espèces que comporte le peuplement considéré dans un écosystème donné (Ngom *et al.*, 2013). La richesse spécifique moyenne correspond au nombre moyen d'espèces par relevé pour un échantillon

donné.

- La densité observée ou densité réelle est obtenue par le rapport de l'effectif total des individus dans l'échantillon (**N**) par la surface échantillonnée (**S**). Elle s'exprime en individus/ha.

$$D_r = N / S$$

- Le couvert ligneux est la surface de la couronne de l'arbre projetée verticalement au sol. Il est exprimé en mètre carré par hectare ( $m^2 \cdot ha^{-1}$ ).

$$C = \frac{\sum \pi \left( \frac{d_{mh}}{2} \right)^2}{S_E}$$

C = couvert ligneux ; dmh = diamètre moyen du houppier en m ; SE = surface de l'échantillon considéré en ha.

- L'indice de diversité ( $H'$ ) de Shannon-Weaver (1949) est le plus couramment utilisé. Il exprime l'importance relative du nombre d'espèces abondantes dans un milieu donné. L'indice de Shannon permet d'exprimer la diversité spécifique d'un peuplement étudié. Pour rappel, la diversité spécifique caractérise le nombre plus ou moins grand d'espèces présentes dans un peuplement. S'il est homogène (constitué d'une seule et même espèce), alors l'indice  $H' = 0$ . Plus nous sommes en présence d'espèces différentes, plus sa valeur augmente de façon logarithmique. Il est ainsi fréquent de voir des valeurs  $H'$  comprises entre 1 et 5 pour tenir compte de la diversité spécifique. L'indice de Shannon- Weaver, exprimé en bits (ou en Sha selon les auteurs) :

$$H' = -\sum p_i \log_2 p_i$$

avec  $P_i$  = abondance relative de chaque espèce ;  $\log_2$  = logarithme calculé avec comme base 2 ;  $P_i = N_i/N$  avec  $N_i$  = l'effectif de l'espèce  $i$  ;  $N$  = effectif total des espèces

- L'indice de régularité ( $E$ ) renseigne sur la distribution des abondances des espèces dans le peuplement. Il est compris entre 0 et 1. Il tend vers 0 quand l'ensemble des individus correspond à une seule espèce. Il tend vers 1 lorsque chacune des espèces est représentée par le même nombre d'individus (Ramade, 2009).

$$E = H' / H_{max}$$

avec  $H_{max} = \log_2(S)$  avec  $S$  = effectif total des espèces

### 2.3.1.2. Carbone du sol

En plus de la densité apparente, le stock de carbone hors houppier, sous houppier et total a été calculé pour chaque site de l'étude. Les formules ci-après ont été utilisées :

- La densité apparente est un indicateur du compactage du sol. Il est calculé comme le poids sec du sol divisé par son volume. Ce volume comprend le volume de particules de sol et le volume de pores parmi les particules de sol.

$$D_a = m/v$$

$D_a$  est en g/cm<sup>3</sup> ;  $m$  est la masse sèche du sol en g ;  $v$  le volume du sol équivalent au volume du cylindre en cm<sup>3</sup>.

- Le stock sous et hors houppier du sol équivaut à la teneur en carbone organique pour un horizon constitutif du sol (tonne C.ha<sup>-1</sup>)

$$\text{Stock (HHouSH)} = \sum_{i=1}^n D_{ai} * T_{ci} * P * (1 - frag) * 10$$

$D_{ai}$  = Densité apparente par site (tonne/m<sup>3</sup>) ;  $T_{ci}$  = concentration du carbone organique par site (g.C/kg sol) ;  $P$  = profondeur de l'horizon ou épaisseur de la couche du sol (m) ;  $frag$  = pourcentage de volume de fragments grossiers/100

- Le stock total de carbone organique par site représente la teneur en carbone organique des sols représentative du type de formation végétale et du sol étudié (exprimée en tonne C.ha<sup>-1</sup>)

$$\text{Stock (site)} = T_x \times \text{stockSH} + (1-T_x) \times \text{stockHH}$$

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.

### 2.3.2. Elaboration des modèles d'estimation du stock de carbone

La modélisation a consisté à combiner des données in situ et satellitaires avec des algorithmes de *machine learning* (apprentissage automatique) pour estimer le stock de carbone du sol. L'apprentissage automatique est un sous-ensemble de l'intelligence artificielle (IA) où les algorithmes sont entraînés à trouver des modèles et des corrélations dans de grands ensembles de données, ainsi qu'à prendre les meilleures décisions et à émettre les meilleures prévisions en s'appuyant sur leur analyse (Sap, 2022). Après un test des algorithmes *Support Vector Machine*

et *Random Forest*, nous avons opté pour *Random Forest*, proposé par Leo Breiman et Adèle Cutler (2001), qui a présenté la meilleure performance. Ainsi, le modèle *Random Forest* (ou forêt aléatoire) a été utilisé pour modéliser le stock de carbone dans cette étude. Il s'agit d'un algorithme de classification qui réduit la variance des prévisions d'un arbre de décision seul, améliorant ainsi leurs performances. Concrètement, chaque arbre de la forêt aléatoire est entraîné sur un sous-ensemble aléatoire de données selon le principe du bagging (un tirage aléatoire avec remplacement sur les observations c'est à dire les lignes de la base de données), avec un sous-ensemble aléatoire des caractéristiques variables des données, selon le principe des « projections aléatoires ». Les estimations des différentes forêts aléatoires sont ensuite moyennées lorsque les données sont quantitatives comme dans le cas de cette étude. L'algorithme des forêts aléatoires est connu pour être un des modèles les plus efficaces car nécessitant peu de prétraitement des données (Kermorvant, 2022). Afin d'optimiser les résultats obtenus et tenant compte du nombre réduits d'observations, la technique de validation croisée a été adoptée. Le facteur de tirage (*Seed*) a été ajusté jusqu'à retrouver les meilleurs résultats. La performance des modèles a été appréciée à travers l'erreur quadratique moyenne relative (RMSE), le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et la valeur relative de l'erreur quadratique moyenne (RRMSE). Plus le RRMSE est petit et le  $R^2$  est grand, plus le modèle est performant.

## CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

### 3.1. Analyse de la composition floristique des sites de l'étude

La flore ligneuse recensée au niveau des sites du CSE (Zone soudano-sahélienne) et du Sud du Sénégal (Zone soudano-guinéenne) est constituée de 61 espèces réparties dans 48 genres et 22 familles.

Dans les sites du CSE : 44 espèces, réparties en 37 genres appartenant à 20 familles ont été recensées. Les familles les plus représentées sont les *Fabaceae* (10 espèces) suivies des *Combretaceae* (6 espèces), des *Capparaceae* (4 espèces) et les *Rubiaceae* (3 espèces). Les genres les plus représentés sont *Combretum* et *Acacia* avec 3 espèces chacun et *Boscia*, *Grewia*, *Pterocarpus* avec 2 espèces chacune (Tableau 2).

Dans les sites du Sud : 28 espèces réparties en 23 genres appartenant à 13 familles ont été recensées. Les familles les plus représentées sont les *Fabaceae* (9 espèces), les *Combretaceae* (5 espèces) et les *Anacardiaceae* (3 espèces). Les genres comprenant le plus grand nombre d'espèces sont *Combretum* avec 4 espèces et *Lannea* avec 3 espèces (Tableau 2).

**Tableau 2:** Composition floristique des ligneux dans les sites du CSE et du Sud

Familles	Genres	Espèces	Sites CSE	Sites du Sud
<i>Anacardiaceae</i>	<i>Lannea</i>	<i>L. acida</i> A. Rich.	+	+
		<i>L. microcarpa</i> Engl. & K. Krause	-	+
		<i>L. velutina</i> A. Rich.	-	+
	<i>Sclerocarya</i>	<i>S. birrea</i> (A. Rich.) Hochst.	+	-
<i>Annonaceae</i>	<i>Annona</i>	<i>A. senegalensis</i> Pers.	-	+
	<i>Hexalobus</i>	<i>H. monopetalus</i> (A. Rich.) Engl. & Diels	+	-
<i>Apocynaceae</i>	<i>Adenium</i>	<i>A. obesum</i> (Forssk.) Roem. & Schult.	+	-
	<i>Holarrhena</i>	<i>Holarrhena floribunda</i> (G. Don) T. Durand & Schinz	-	+
<i>Areaceae</i>	<i>Elaeis</i>	<i>E. guineensis</i> Jacq.	-	+
<i>Asclepiadaceae</i>	<i>Calotropis</i>	<i>C. procera</i> (Aiton) W.T. Aiton	+	-
	<i>Leptadenia</i>	<i>L. pyrothechnica</i> (Forssk.) Decne.	+	-

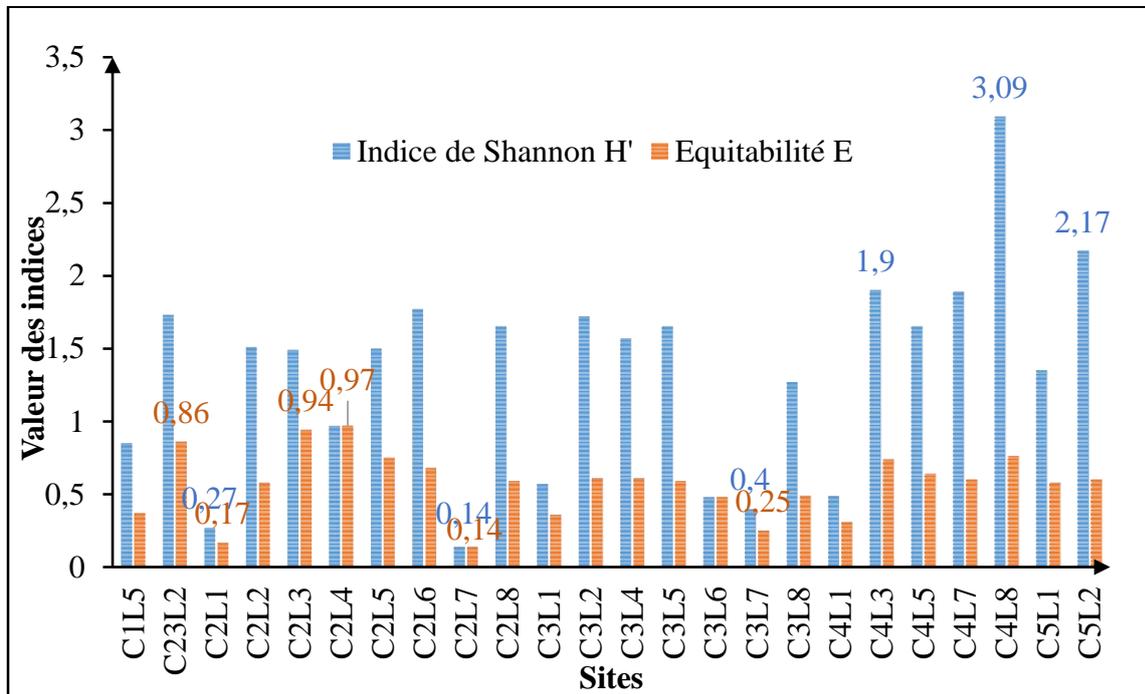
<b>Balanitaceae</b>	<i>Balanites</i>	<i>B. aegyptiaca</i> (L.) Delile	+	-
<b>Bignoniaceae</b>	<i>Stereospermum</i>	<i>S. kunthianum</i> Cham.	+	-
<b>Bombacaceae</b>	<i>Adansonia</i>	<i>A. digitata</i> L.	+	-
	<i>Bombax</i>	<i>B. costatum</i> Pellegr. & Vuillet	+	+
<b>Burseraceae</b>	<i>Commiphora</i>	<i>C. africana</i> (A.Rich.) Engl.	+	-
<b>Capparaceae</b>	<i>Boscia</i>	<i>B. angustifolia</i> A.Rich.	+	-
		<i>B. senegalensis</i> (Pers.) Lam. ex Poir.	+	-
	<i>Capparis</i>	<i>C. decidua</i> (Forssk.) Edgew.	+	-
	<i>Maerua</i>	<i>M. angolensis</i> DC.	+	-
<b>Celastraceae</b>	<i>Maytenus</i>	<i>M. senegalensis</i> (Lam.)Exell	+	+
<b>Combretaceae</b>	<i>Anogeissus</i>	<i>A. leiocarpus</i> (DC.) Guill. & Perr.	+	-
	<i>Combretum</i>	<i>C. collinum</i> Fresen.	-	+
		<i>C. glutinosum</i> auct.et Perr.	+	+
		<i>C. micranthum</i> G. Don	+	+
		<i>C. nigricans</i> Lepr. ex Guill. & Perr.	+	+
	<i>Guiera</i>	<i>G. senegalensis</i> J.F.Gmel.	+	-
	<i>Terminalia</i>	<i>T. avicennodois</i> Guill. & Perr.	+	-
<i>T. macroptera</i> Guill. & Perr.		-	+	
<b>Commelinaceae</b>	<i>Commelina</i>	<i>C. leiocarpa</i> Benth.	+	-
<b>Fabaceae</b>	<i>Acacia</i>	<i>A. macrostachya</i> Reich.ex DC.	+	+
		<i>A. radiana</i> (Savi)	+	-
		<i>A. seyal</i> Auct.	+	-
	<i>Bauhinia</i>	<i>B. rufescens</i> Lam.	+	-
	<i>Bobgunnia</i>	<i>B. madagascariensis</i> (Desv.) J.H.	-	+
		Kirkbr. & Wiersema		
	<i>Burkea</i>	<i>B. africana</i> Hook.	-	+
	<i>Cassia</i>	<i>C. sieberiana</i> DC.	-	+
	<i>Cordyla</i>	<i>C. pinnata</i> (Lepr. ex A. Rich.) Milne-Redh.	+	+
	<i>Dalbergia</i>	<i>D. melanoxyton</i> Guill. & Perr.	+	-
	<i>Dichrostachys</i>	<i>D. glomerata</i> (Forssk.) Chiov.	+	-

	<i>Parkia</i>	<i>P. biglobosa</i> (Jacq.) R. Br. ex G. Don	-	+
	<i>Piliostigma</i>	<i>P. thonningii</i> (Schumach.) Milne-Redh.	-	+
		<i>P. reticulatum</i> (DC.) Hochst.	+	-
	<i>Prosopis</i>	<i>P. africana</i> (Guill. & Perr.) Taub.	-	+
	<i>Pterocarpus</i>	<i>P. erinaceus</i> Poir.	+	+
		<i>P. lucens</i> Guill. & Perr.	+	-
	<i>Xeroderrus</i>	<i>X. stuhlmannii</i> (Taub.) Mendonça & E.P. Sousa	+	-
<b>Lamiaceae</b>	<i>Vitex</i>	<i>V. madiensis</i> Oliv.	-	+
		<i>V. doniana</i> Sweet	+	-
<b>Loganiaceae</b>	<i>Strychnos</i>	<i>S. spinosa</i> Lam.	+	+
<b>Malvaceae</b>	<i>Ceiba</i>	<i>C. pentandra</i> (L.) Gaertn.	-	+
	<i>Grewia</i>	<i>G. bicolor</i> Jus.	+	-
		<i>G. flavescens</i> Juss.	+	+
<b>Poaceae</b>	<i>Oxytenanthera</i>	<i>O. abyssinica</i> (A. Rich.) Munro	-	+
<b>Polygalaceae</b>	<i>Securidaca</i>	<i>S. longipedunculata</i> Fresen.	+	-
<b>Rhamnaceae</b>	<i>Ziziphus</i>	<i>Z. mauriciana</i> auct.	+	-
<b>Rubiaceae</b>	<i>Crossopterys</i>	<i>C. febrifuga</i> (Afzel. ex G. Don) Benth.	+	+
	<i>Gardenia</i>	<i>G. ternifolia</i> Schumach. & Thonn.	+	-
	<i>Feretia</i>	<i>F. apodanthera</i> Delile	+	-
<b>Sterculiaceae</b>	<i>Sterculia</i>	<i>S. setigera</i> Delile	+	-

### 3.2. Diversité de la végétation ligneuse dans les sites de l'étude

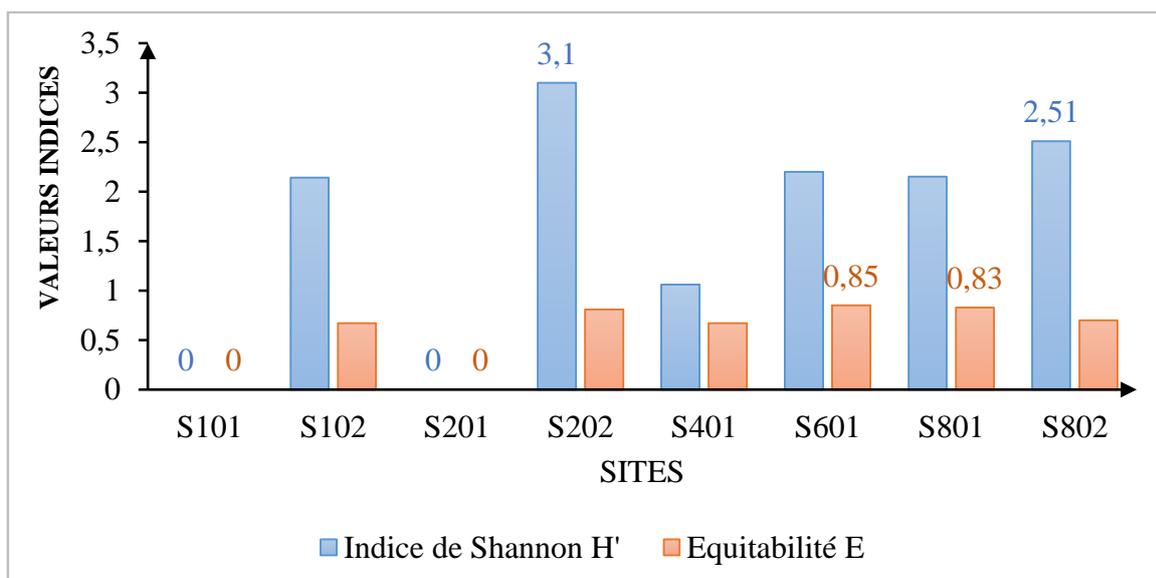
L'analyse de la figure 4 a montré une forte variation des indices de Shannon et de Pielou suivant les sites du CSE. En effet, les valeurs de l'Indice de Shannon les plus élevées ont été observées avec le site C4L8 (au sud de la zone sylvopastorale) qui a enregistré un indice de Shannon de 3,09 et comportant 17 espèces dominées par *Strychnos spinosa* (voir Annexe 5) et le site C5L2 constitué de 12 espèces dominées par *Combretum glutinosum* avec un Indice de Shannon de 2,17. Les plus petites valeurs de cet indice sont observées dans les sites C2L7 (0,14), C2L1 (0,27) et C3L7 (0,4).

Pour l'indice d'Equitabilité de Pielou, les valeurs les plus grandes sont observées dans les sites C2L4 (0,97), C2L3 (0,94) et C23L2 (0,86) alors que les plus petites valeurs sont observées dans les sites C2L7 (0,14), C2L1 (0,17) et C3L7 (0,25).



**Figure 4:** Indices de diversité des sites du CSE

Dans les sites du Sud, l'indice de Shannon présente sa valeur la plus élevée (3,1) (Figure 5). Ce site est constitué de 14 espèces dominées par *Vitex madiensis* (Annexe 6). Il est suivi du site S802 (2,51) 12 espèces dominées par le genre *Combretum*. Les sites avec les indices d'Equitabilité les plus élevés sont S601 (0,85) et S801 (0,83).



**Figure 5 :** Indices de diversité des sites du Sud

### 3.3. Influence des caractéristiques de la végétation ligneuse et des facteurs pédologiques sur le stock de carbone du sol au des sites du CSE et du Sud

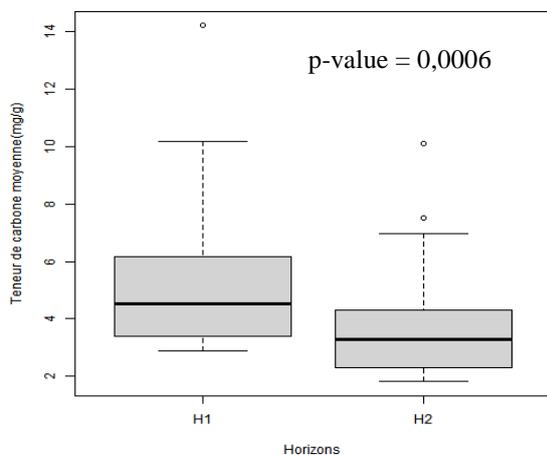
#### 3.3.1. Effet du couvert ligneux et de l'horizon de prélèvement du sol sur le stock de carbone du sol

##### 3.3.1.1. Sites du CSE

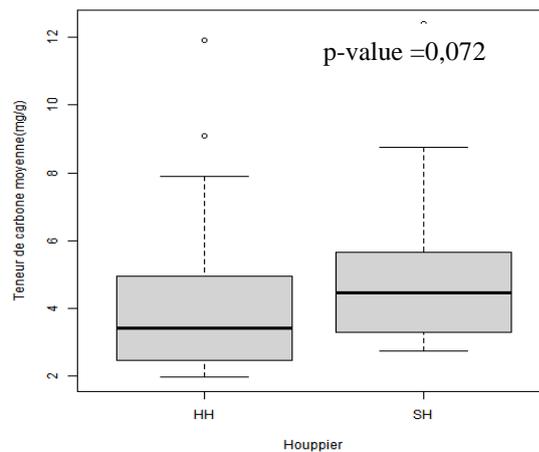
Les diagrammes en boîte ci-dessous ( Figure 6 et Figure 7) illustrent les niveaux de carbone du sol en de la présence ou non de couvert ligneux (sous houppier ou hors houppier) et fonction de la profondeur de prélèvement (0 à 10 cm et 10 à 30 cm).

Considérant l'effet de l'horizon de prélèvement du sol sur le stock de carbone, l'analyse statistique a révélé une différence très hautement significative ( $p$ -value = 0,0006) de la teneur en carbone du sol entre les deux horizons. En effet, pour l'horizon 0 à 10 cm, la médiane est de 4,4 mg/g avec une valeur maximale de 14,4 mg/g et une valeur minimale de 2,3 mg/g. En revanche, l'horizon 10 à 30 cm affiche une médiane de 3,2 mg/g avec une valeur maximale de 10,3 mg/g et une valeur minimale de 1,6 mg/g.

Pour ce qui est de l'effet du couvert ligneux, aucune différence significative n'a été observée ( $p$ -value = 0,072 > 0,05) entre le stock de carbone de la zone sous couvert et celui de la zone hors couvert. Toutefois en valeur absolue, le stock de carbone du sol est plus élevé sous houppier avec une médiane de 4,4 mg/g comparé à la zone hors houppier à (3,6mg/g). La valeur maximale du stock de carbone sous houppier est de 12,4 mg/g contre 11,9 mg/g pour la zone hors houppier. La valeur minimale sous houppier est de 2,7 mg/g contre 1,9mg/g pour la zone hors houppier.



**Figure 7** : Teneur carbone en fonction de l'horizon (CSE)



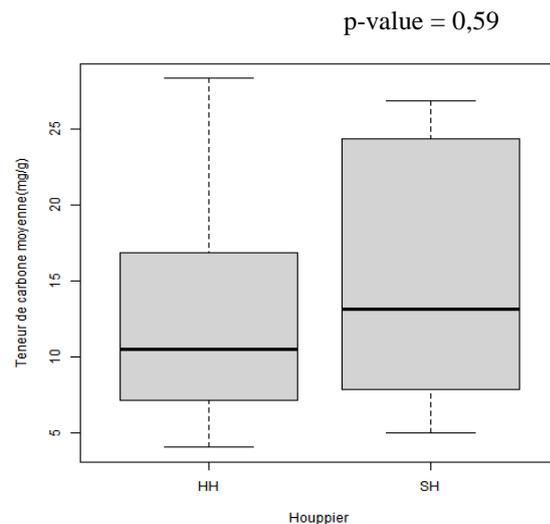
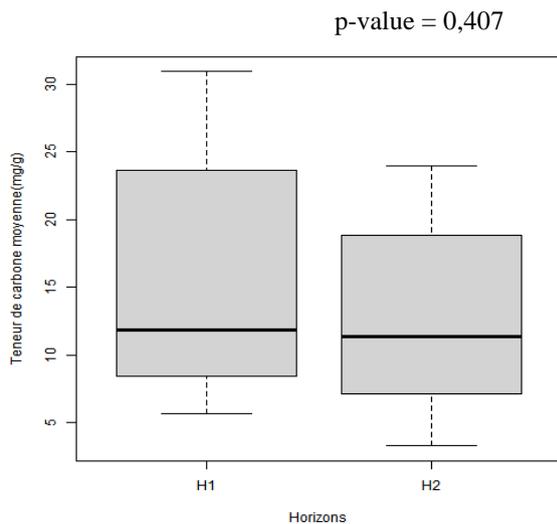
**Figure 6** : Teneur carbone hors et sous houppier (CSE)

### 3.3.1.2. Sites du Sud

Les concentrations de carbone du sol dans les sites du Sud ne présentent pas de variations significatives en fonction des horizons ( $p$ -value = 0,407) et en fonction de la présence ou de l'absence de couverture ligneuse ( $p$ -value = 0,59).

Pour les horizons (Figure 8), la médiane s'élève à 11,9 mg/g pour la profondeur de 0 à 10 cm, tandis qu'elle est de 11,3 mg/g pour la profondeur de 10 à 30 cm. La valeur maximale pour l'horizon 1 (0 à 10 cm) atteint 33,9 mg/g, comparée à 25,3 mg/g pour l'horizon 2 (10-30 cm). La valeur minimale enregistrée pour l'horizon de 0 à 10 cm est de 4,9 mg/g, tandis que celle de l'horizon 2 est de 3,08 mg/g.

S'agissant des teneurs en carbone selon la présence de houppier (SH) (Figure 9) et l'absence de houppier (HH) a été observé une médiane de 9,3mg/g en zone hors houppier (HH) contre une médiane de 14,3 mg/g en zone sous houppier (SH). La valeur maximale hors houppier est de 33,9mg/g et de 28,9 mg/g sous houppier. Quant à la valeur minimale hors houppier, elle est de 4,9mg/g et celle sous houppier de 6,4mg/g (Figure 8).



**Figure 9 :** Teneur carbone hors et sous houppier (Sud)

**Figure 8 :** Teneur carbone en fonction de l'horizon (Sud)

### 3.3.2. Effet de la diversité spécifique de la végétation ligneuse sur le stock de carbone du sol

#### 3.3.2.1. Sites du CSE

Le tableau 3 traduit la corrélation entre le stock de carbone sous houppier et les indices de diversité de la végétation ligneuse dans les sites du CSE. L'analyse de ce tableau révèle une corrélation positive et significative ( $r = 0,66$ ) entre le stock de carbone sous houppier et l'indice

de Shannon. Par contre, cette corrélation est faible entre le stock de carbone et l'indice d'Equitabilité ( $r = 0,21$ ).

**Tableau 3:** Corrélation entre le stock de carbone sous houppier des sites du CSE et les indices de diversité

	<b>Stock C SH</b>	<b>Indice de Shannon</b>	<b>Indice Equitabilité</b>
<b>Stock C SH</b>	1		
<b>Indice de Shannon</b>	0,66	1	
<b>Indice Equitabilité</b>	0,21	0,68	1

### 3.3.2.2. Sites du Sud

Dans les sites du Sud, il apparait une faible corrélation entre le stock de carbone du sol sous couvert et les indices de diversité avec des coefficients de corrélation de 0,16 et 0,32 respectivement pour l'indice d'Equitabilité et l'indice de Shannon (Tableau 4).

**Tableau 4:** Corrélation entre le stock de carbone sous houppier des sites du Sud et les indices de diversité

	<b>Stock C SH</b>	<b>Indice de Shannon</b>	<b>Indice Equitabilité</b>
<b>Stock C SH</b>	1		
<b>Indice de Shannon</b>	0,32	1	
<b>Indice Equitabilité</b>	0,16	0,90	1

### 3.3.3. Effet des paramètres dendrométriques et structuraux de la végétation ligneuse sur le stock de carbone du sol

Il ressort de l'analyse du tableau 5 qu'au niveau des sites du CSE, le stock de carbone sous houppier est plus corrélé à la densité ligneuse des sites ( $r = 0,61$ ) et faiblement corrélé au taux de couverture ( $r = 0,31$ ). Il est inversement et très faiblement corrélé à la circonférence ( $r = -0,2$ ) et à la hauteur des ligneux ( $r = -0,01$ ). La circonférence est par ailleurs négativement corrélée à la densité.

**Tableau 5:** Corrélation entre les caractéristiques des ligneux et le stock de carbone sous houppier des sites du CSE

	Stock C SH	Hauteur	Circonférence	Densité	Taux de couverture
Stock C SH	1				
Hauteur	-0,010	1			
Circonférence	-0,20	<b>0,93</b>	1		
Densité	<b>0,61</b>	-0,43	<b>-0,60</b>	1	
Taux de couverture	0,31	-0,02	-0,162	0,47	1

Au niveau des sites du Sud, il apparait une faible corrélation entre le stock de carbone sous houppier et la densité des ligneux (0,18), de même qu'entre le stock de carbone sous houppier et le taux de couverture (0,06) (Tableau 6). Quant à la circonférence au tronc des ligneux, elle affiche une corrélation négative et faible avec le stock de carbone sous houppier (-0,19).

**Tableau 6:** Corrélation entre les caractéristiques des ligneux et le stock de carbone sous houppier des sites du Sud

	Stock C SH	Circonférence	Densité	Taux de couverture
Stock C SH	1			
Circonférence	-0,19	1		
Densité	0,18	-0,36	1	
Taux de couverture	0,06	-0,19	<b>0,92</b>	1

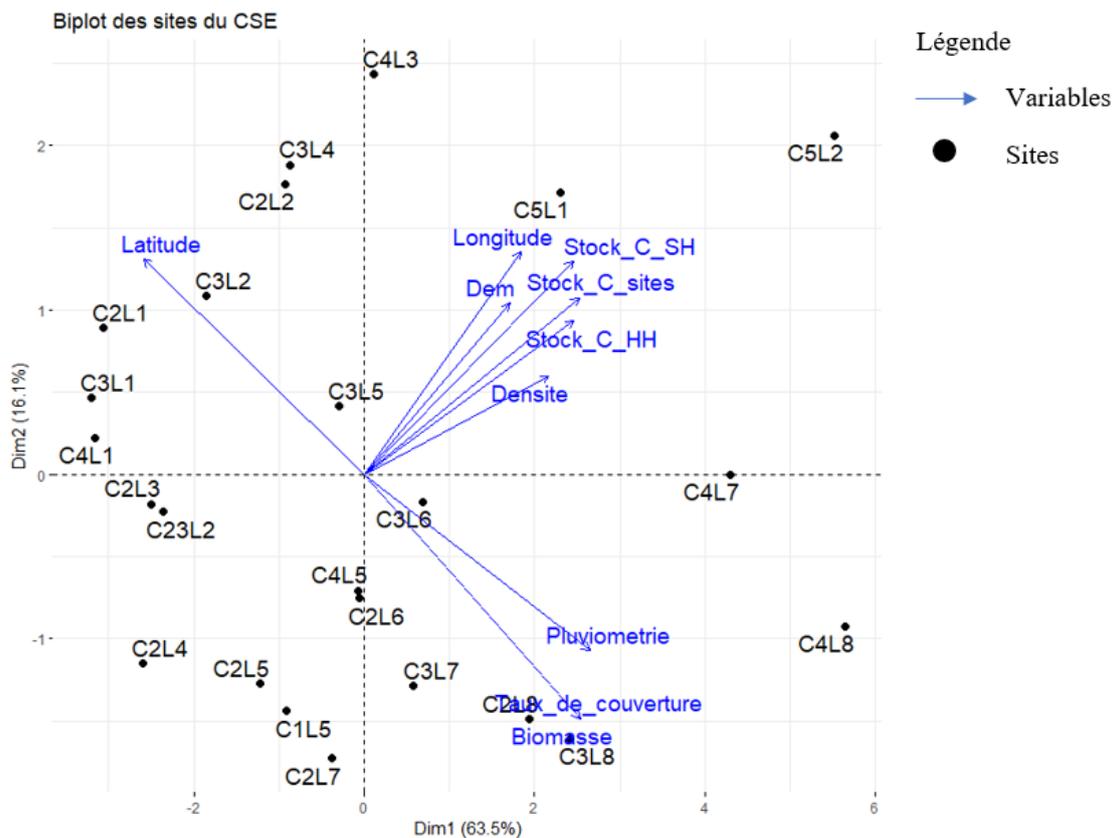
### 3.4. Relation entre des variables étudiées et les sites

#### 3.4.1. Sites du CSE

Globalement, les moyennes des stocks de carbone sous houppier, hors houppier, et au niveau des sites sont respectivement de 17,67 t/ha, 14,97 t/ha et 15,58 t/ha. Les stocks de carbone calculés sont donc plus élevés sous houppier que hors houppier. L'ACP réalisée à partir des variables-stocks de carbone, facteurs environnementaux (Annexe 2) et caractéristiques de la

végétation ligneuse présentant les meilleures corrélations (tableau 3) et les sites du CSE est illustré par la figure 10. Cette dernière permet de distinguer deux groupes de sites :

- un groupe avec les sites situés du côté des abscisses positives et fortement corrélé avec les variables stock de carbone, densité ligneuse, pluviométrie, longitude, élévation modèle de terrain (DEM), taux de couverture et biomasse.
- un second groupe de sites situé du côté des abscisses négatives avec une latitude élevée. Ce groupe est caractérisé par un stock de carbone du sol faible et par des faibles valeurs des paramètres environnementaux et des paramètres dendrométriques et structuraux de la végétation ligneuse. La latitude n'influe pas sur les paramètres environnementaux, les caractéristiques ligneuses et le stock de carbone.



**Figure 10 : ACP des variables et des sites du CSE**

### 3.4.2. Sites du Sud

Les stocks moyens de C sous houppier, hors houppier et au niveau des sites du Sud globalement sont respectivement de 38,48t/ha, de 31,96 t/ha et de 33,34 t/ha. Les stocks de C calculés sont donc plus élevés sous houppier que hors houppier.

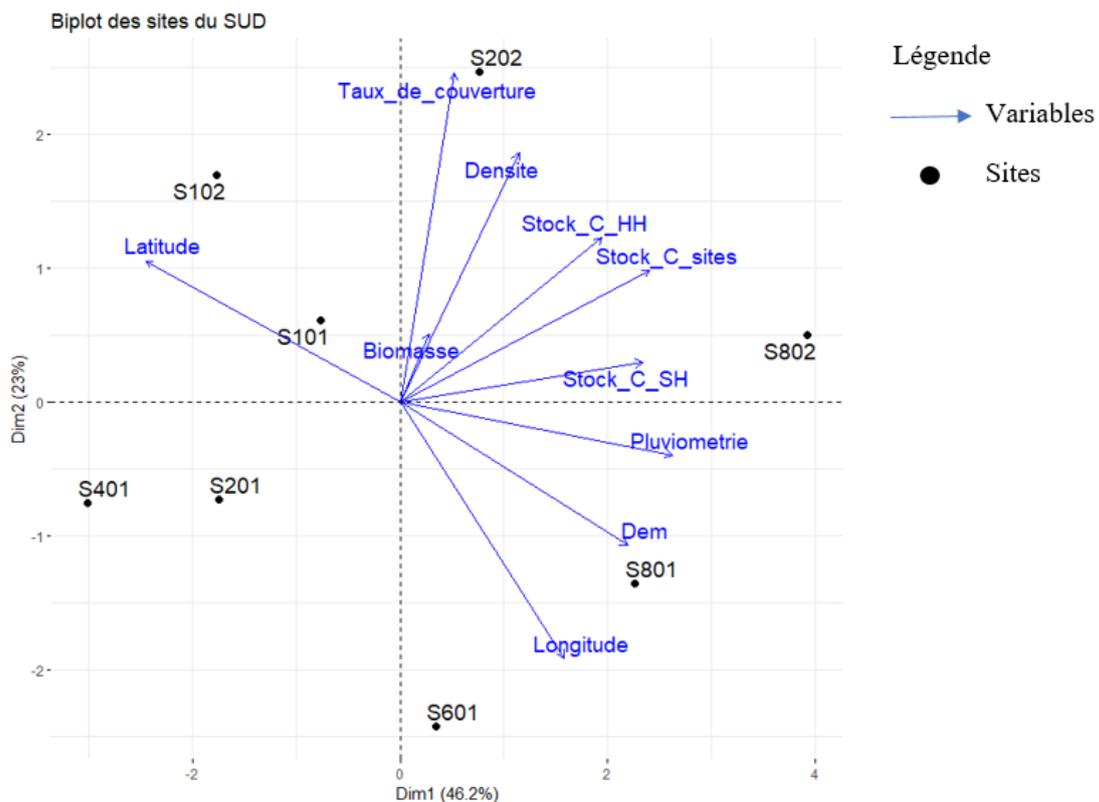
L'ACP des sites du Sud (figure 11) montre 2 grands groupes de sites à savoir les sites du Sud-Est du côté des abscisses positives et les sites du Sud-Ouest du côté des abscisses négatives.

- le premier groupe situé du côté des abscisses positives est constitué des sites S601, S801 et S802. Ces sites sont caractérisés par des stocks de carbone, une densité ligneuse, une pluviométrie, une biomasse, un taux de couverture et une longitude élevés.

Il apparaît ainsi que les sites du Sud-Est aux basses latitudes ont une plus forte pluviométrie, une plus forte densité et biomasse que les sites avec des longitudes plus grandes. Les différents paramètres semblent évoluer donc selon un gradient Est-Ouest et la latitude.

- le second groupe constitué des sites S101, S102, S201, S202 et S401 est caractérisé par des latitudes élevées et la faiblesse du stock de carbone, des paramètres environnements et des paramètres dendrométriques et structuraux de de la végétation.

Et le stock de carbone des sites est bien corrélé à la pluviométrie ( $r = 0,69$ ). Le stock hors houppier est plus corrélé au stock du site qu'au stock sous houppier. La latitude n'est corrélée positivement à aucune variable.



**Figure 11 : Biplot entre les variables et les sites du Sud**

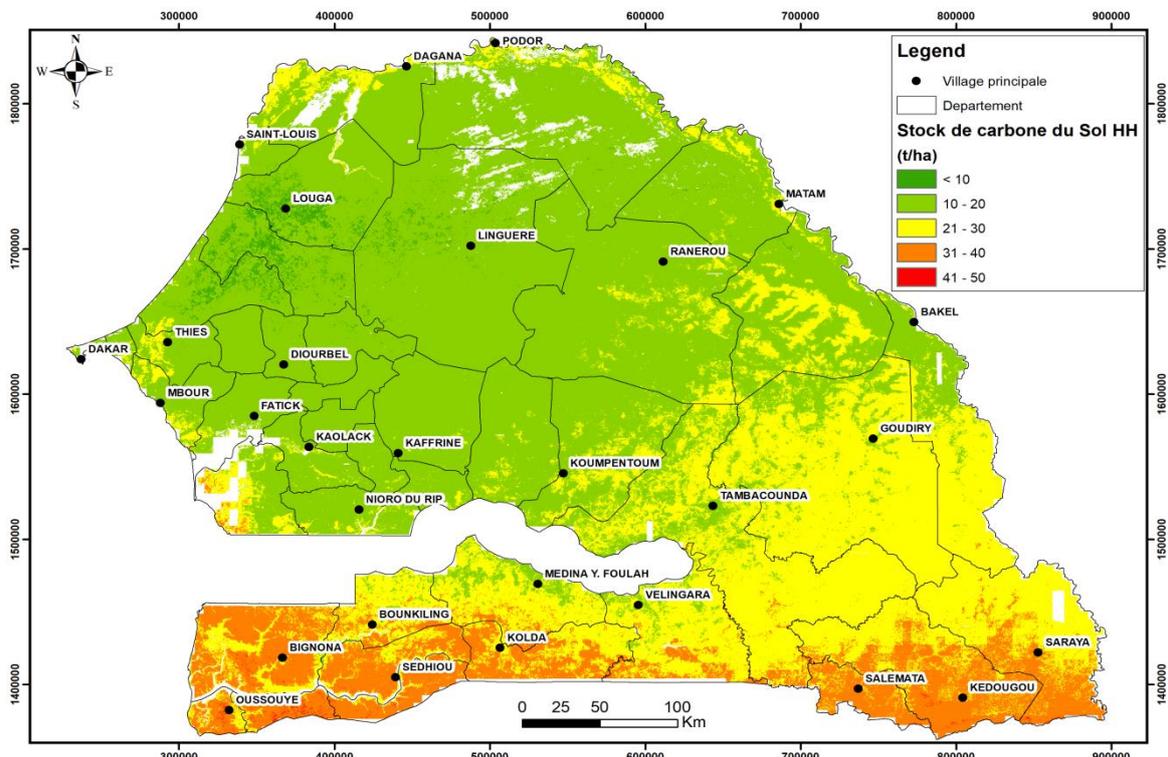
### 3.5. Evaluation du stock de carbone avec les modèles Random Forest

Les résultats des modèles d'estimation des trois variables de stock de carbone du sol sont consignés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 7** : Présentation des paramètres de performance des trois modèles calibrés

Modèle	RMSE (tC/ha)	R <sup>2</sup>	RRMSE (%)
Hors Houppier	10,99	0,61	57,2%
Sous Houppier	11,80	0,70	51,6%
Sites	10,40	0,63	45,5%

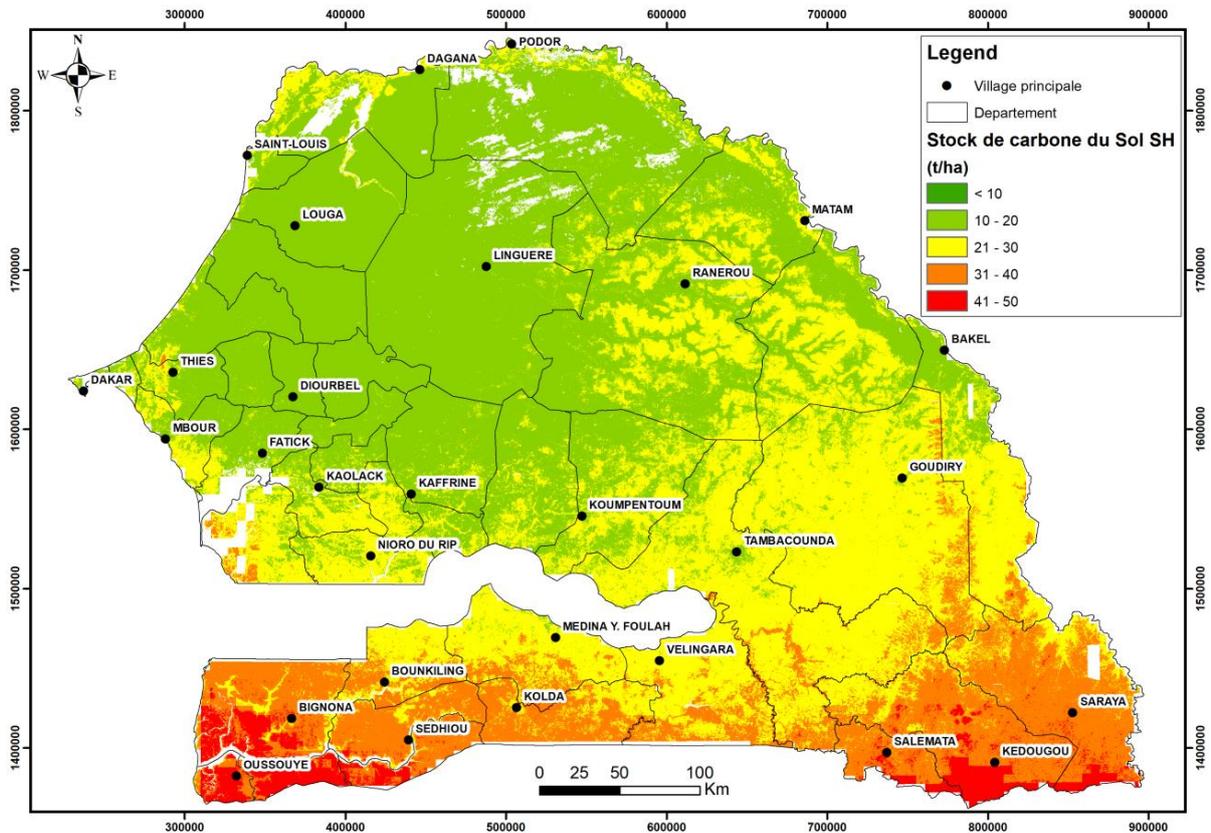
La modélisation des stocks de carbone hors houppier avec les données de l'annexe 7 aboutit à la carte des stocks de carbone présentée dans la figure 12. Avec un nombre d'arbres (ntree) fixé à 500, les résultats montrent un RMSE de 10,99 tC/ha, un R<sup>2</sup> de 0,61, et un RRMSE de 57,2%. La carte obtenue révèle une variation du stock de carbone allant de 0 à plus de 40tC/ha sur l'ensemble du territoire sénégalais, avec des valeurs plus élevées au Sud (Figure 12).



**Figure 12** : Répartition du stock de carbone Hors Houppier à l'échelle du Sénégal

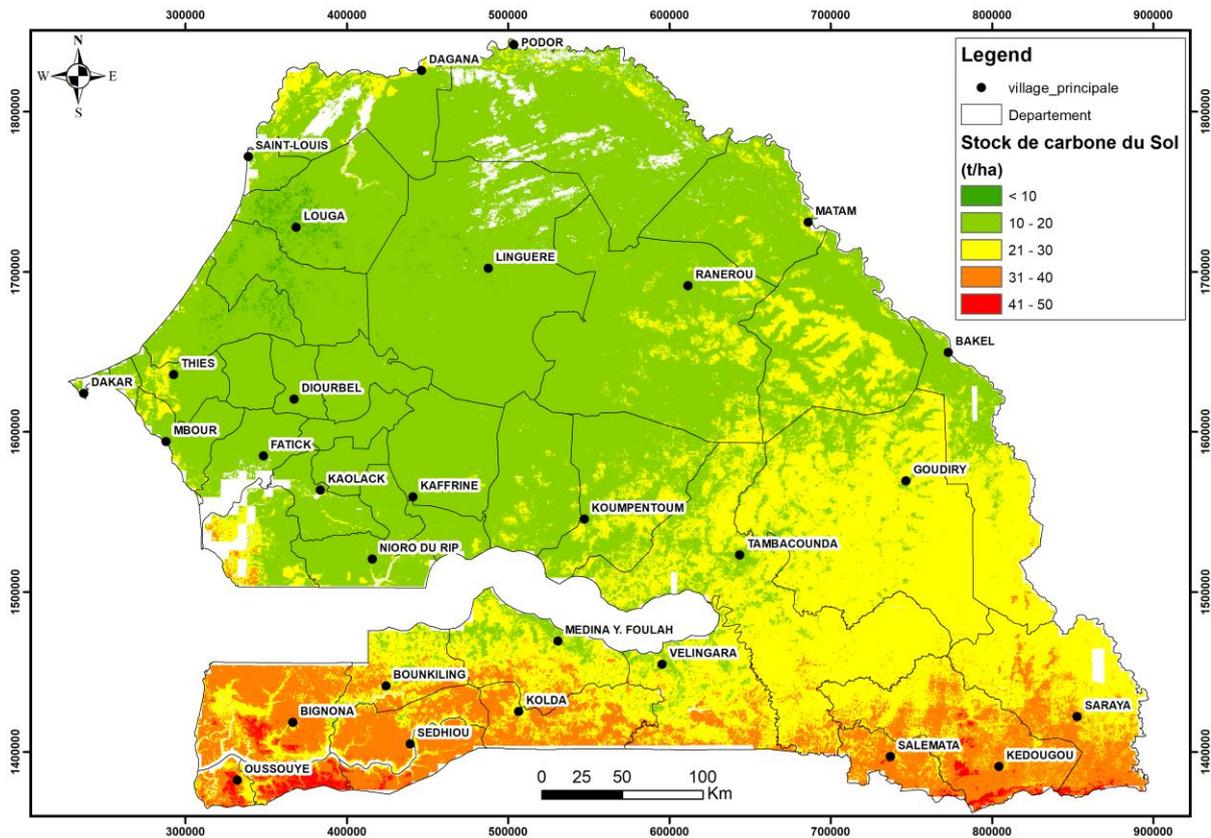
La modélisation des stocks de carbone sous houppier incluant les variables environnementales et les caractéristiques des sols de l'Annexe 7 a abouti à la carte présentée par la figure 13.

Avec un modèle de 500 arbres ( $n_{tree}=500$ ), le RMSE obtenu est de 11,80 tC/ha, le  $R^2$  de 0,70 et RRMSE de 51,6%. Le stock de carbone hors houppier varie de 0 à plus de 50tC/ha sur l'ensemble du territoire sénégalais, avec un gradient nord-sud assez prononcé (Figure 13).



**Figure 13 :** Répartition du stock de carbone sous houppier

Concernant la modélisation du stock de carbone des sites (Figure 14), les résultats obtenus avec un modèle basé sur 500 arbres aléatoire ( $n_{tree}=500$ ) ont montré un RMSE de 10,4 tC/ha, un  $R^2$  de 0,63 et un RRMSE de 45,5%. Les valeurs du stock de carbone total varient 0 à 45tC/ha sur l'ensemble du territoire sénégalais, avec des valeurs plus élevées au Sud.



**Figure 14:** Répartition du carbone total à l'échelle du Sénégal

### 3.6. Discussion

#### 3.6.1. Relation entre diversité et stock de carbone du sol

Les analyses du tableau de corrélation des indices de diversité Shannon, d'Equitabilité avec le stock de carbone sous houppier au niveau des sites du CSE montre que plus le peuplement est diversifié en espèces plus le stock de carbone du sol augmente. Il apparaît aussi le nombre d'individus influe faiblement sur le stock de carbone. En effet, le site C2L4 avec 10 individus détient 10,54 t/ha de carbone contre 9,59 tC/ha de carbone pour le site C2L7 comportant 49 individus. Ceci pourrait être dû à la présence d'une litière qui se dégrade mieux en matière organique ou d'une diversité plus élevée au niveau du site C2L4. En effet, une litière diversifiée offre un large choix aux micro-organismes contre une litière à tendance mono spécifique avec des caractéristiques quelque fois difficilement biodégradables. Cette affirmation corrobore l'étude de Berg *et al.*, (2001) stipulant que les retombées de litière sont l'une des principales sources de carbone organique dans les sols forestiers et la décomposition de cette litière fait partie des processus qui déterminent les quantités de carbone stockées dans l'humus. En effet selon Banville, (2009) la production de litière est contrôlée par la productivité végétale des sites et conséquemment par les espèces d'arbres. Les sites du Sud montre une corrélation positive

mais faible entre les indices de diversité et le stock de carbone du sol sous houppier. En effet dans certains sites monospécifiques tels que S101 à *Prosopis africana*, le stock de carbone du sol sous houppier est de 42,71 tC/ha tandis que le site S601 est constitué de 6 espèces avec un stock de carbone du sol sous houppier de 19,66 tC/ha. Cette corrélation faible ( $r=0,16$ ) pour l'équitabilité E et pour Shannon ( $r=0,32$ ) avec le stock de carbone pourrait s'expliquer par la couverture ligneuse des espèces. Cette couverture n'est pas forcément liée à la densité des ligneux. En effet, le site S101 avec 3 individus à une couverture ligneuse de 19,92 % contre une couverture de 6,18 % pour le site S601 avec 15 individus. L'ensemble des résultats des sites du CSE et des sites du Sud nous permettent d'affirmer alors que le stock du carbone du sol augmente selon le nombre d'espèces en tenant compte de leur couverture ligneuse qui agissent directement sur la diversité et la quantité de litière décomposable en matière organique.

### **3.6.2. Variation de la teneur en carbone du sol en fonction de l'horizon, du houppier et des caractéristiques de la végétation ligneuse**

Au niveau des sites du CSE les teneurs en C varie significativement ( $pvalue = 0,072$ ) selon la présence ou non couverture ligneuse. Par contre, une différence significative ( $pvalue = 0,0006$ ) du stock de carbone est notée entre les horizons avec des teneurs médianes de 4,4mg/g pour l'horizon 0-10cm et de 3,2 mg/g pour l'horizon 10-30 cm. Dans les sites du Sud, aucune différence significative ( $pvalue = 0,59$ ) du stock de carbone n'est observée entre les zones hors et sous couvert et entre les horizons 0-10 cm et 10-20 cm ( $pvalue = 0,40$ ) même si en valeur absolue la même tendance que celle des sites du CSE est notée. Ces résultats corroborent ceux de Saïdou et *al.*, (2012) stipulant que la teneur de carbone diminue lorsque la profondeur augmente. Par ailleurs, le stock de carbone du sol sous houppier augmente selon la densité et le taux de couverture des arbres aux différents sites du CSE et aux sites du Sud avec des corrélations plus importantes aux sites du CSE. Ces analyses indiquent une influence positive des arbres sur le carbone du sol, corroborant ainsi les propos de Sarr et Lesueur, (2006) sur l'effet positif de l'arbre sur le sol grâce à la litière produite mais aussi par la plus forte concentration de microorganismes se trouvant sous houppier aux horizons 0-25 cm. Il ressort ainsi des résultats que les teneurs en carbone organique du sol sont élevées à la surface et diminuent avec la profondeur suivant les écosystèmes. Cette observation est classique dans les écosystèmes naturels (Hien et *al.*, 2003 ; Ifo, 2010 ; Paradis, 2016 ; Ifo et *al.*, 2017 ; Ifo et *al.*, 2022). Cette différence peut s'expliquer par la présence massive de la litière et de racines fines en surface. Ce qui favorise une importante activité de la microflore, de la macro faune ainsi que de la microfaune dans les litières (Courbois et *al.*, 1997, Ifo et *al.*, 2022) mais aussi une

production accrue des exsudats et rhizodépôts (Balesdent et *al.*, 2017). Cette faune de litières participe activement à la dégradation et la décomposition des litières, étape importante pour le transfèrement de la matière organique vers le compartiment sol (Ifo, 2010). La biodégradation peut être plus lente en profondeur qu'en surface, en raison de plus fortes interactions organo-minérales (Salomé et *al.*, 2010) ou de moindre capacité des micro-organismes à dégrader les matières organiques car ces derniers reçoivent moins de ressources énergétiques de substrats frais (Fontaine et *al.*, 2007). De plus, ces effets sur les sols varient selon les espèces d'arbres (Diallo et *al.*, 2006).

### **3.6.3. Variation du stock de carbone en fonction des facteurs environnementaux**

Il apparait une forte corrélation entre le stock de carbone des sites ~~total~~ et la densité des ligneux ( $r=0,60$ ), le taux de couverture des ligneux ( $r=0,57$ ), la biomasse ( $r=0,57$ ), la pluviométrie ( $r=0,56$ ) et la longitude ( $r=0,52$ ). L'élévation de terrain (DEM), la densité des arbres et la pluviométrie augmente considérablement en fonction de la longitude avec les valeurs de corrélations respectives suivantes: 0,60 ; 0,58 ; 0,51. Par ailleurs, la biomasse, le taux de couverture et la densité des ligneux augmente selon la pluviométrie avec des valeurs respectives du coefficient de corrélation égales à 0,92 ; 0,92 et 0,60. Les mêmes observations sont notées au niveau des sites du Sud avec des corrélations plus grandes entre le stock de carbone total et la pluviométrie (0,69). La pluviométrie est fortement corrélée à l'altitude (0,75) et moyennement à la longitude (0,51). L'ensemble des analyses montrent que le stock du carbone du sol varie grandement selon les paramètres pédoclimatiques et ligneux. En effet, le stock de carbone total est plus grand dans les sites du Sud marqués par une forte pluviométrie et une grande densité d'arbres. On observe une variation du stock de carbone selon un gradient Nord-Sud et Est-Ouest. Ces résultats confortent les affirmations de chevalier et *al.*, (2020) selon qui le climat est connu comme l'un des artisans de la formation du sol. Le climat joue également un rôle primordial sur la dynamique des éléments minéraux dans le sol, notamment sur la vitesse de minéralisation via la régulation des activités biologiques des sols. En climat chaud et humide, la MO du sol se minéralise rapidement. Par ailleurs, une étude réalisée à Fort Dauphin dans le sud-est de Madagascar montre que les stocks de carbone organique du sol sont impactés par l'altitude mais aussi fortement par le climat (Rakotonarivo, 2010). Le climat, à différentes échelles de temps, influe sur les propriétés physico-chimiques et les activités biologiques des sols. Il est un facteur déterminant des variabilités spatio-temporelles de la distribution des stocks de carbone. En outre, diverses études ont montré des relations entre les propriétés du sol et les stocks ou le stockage de carbone organique du sol. Il existe une relation entre la teneur en argiles granulométriques du sol et sa teneur en COS (Feller et Beare, 1997). L'influence du type

d'argile sur la teneur en carbone du sol est cependant moins claire (Feng et *al.*, 2013 ; Fujisaki et *al.*, 2018). Par conséquent, les sols argileux renferment les agrégats qui protègent le carbone contre la dégradation due aux activités des microbes et des enzymes (Kono et *al.*, 2020). Les sols les plus argileux (vertisols) ont des stocks de C en moyenne supérieurs aux types de sol légèrement moins argileux (ferrisols et sols à halloysite) (Ifo et *al.*, 2022).

#### **3.6.4. Modèle d'évaluation du stock de carbone**

Plusieurs critères peuvent être utilisés pour évaluer la robustesse des modèles de prédiction et la pertinence des résultats. Ainsi, l'incertitude nous renseigne sur les erreurs des valeurs prédites par rapport aux valeurs réelles. Plus les erreurs sont élevées, moins la carte est fiable. Avec les modèles de prédiction du stock de carbone hors houppier, sous houppier et au niveau des sites, les RMSE (erreurs quadratiques moyennes) obtenues sont respectivement 10,99 ; 11,80 ; 10,4 et les coefficients de détermination ( $R^2$ ) sont respectivement de 0,61 ; 0,70 ; 0,63 pour une variance de stock entre 0 à 55t/ha sur tout le territoire du Sénégal. Les coefficients de détermination restent bons particulièrement pour le stock de carbone sous houppier. Cependant l'incertitude reste grande pour des stocks ne dépassant pas 60t/ha. Ces modèles de prédictions ont nécessité l'intégration des facteurs écologiques du sol (fragments, pH, texture, argile, capacité d'échange cationique) et de l'environnement (pluviométrie, altitude, biomasse, taux de couverture) aux différents sites du CSE et du Sud. Afin d'obtenir de meilleurs modèles de prédiction d'autres paramètres devraient être pris en compte selon Chevallier et *al.*, (2020) tels que les hétérogénéités de la couverture pédologique et des modes d'usage des terres, qui influencent la variabilité spatiale des stocks de carbone organique du sol.

### **Conclusion et perspectives**

L'étude des déterminants de la variation spatiale du stock de carbone du sol à travers des sites du Sénégal a montré que les facteurs environnementaux, les ligneux et les caractéristiques du sol influencent grandement le stockage du carbone du sol. En effet, les facteurs environnementaux et les caractéristiques du sol influent sur les ligneux qui par ailleurs agissent sur le sol. Les arbres participent à une amélioration du stockage de carbone plus particulièrement aux horizons supérieurs de par leur diversité, leur litière et de par l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol. L'étude a montré en outre que les sites du Sud ont des stocks de carbone du sol plus élevés que ceux situés un peu plus au Nord, à cause probablement de la pluviométrie et de la densité des arbres plus élevées dans la zone sud. Le modèle d'estimation du carbone total du sol présente des performances acceptables et peut

être très utile pour le suivi régulier du stock de carbone du sol à l'échelle nationale et peut constituer un appui à la prise de décision.

Au vu de ces résultats, il apparaît opportun dans les études ultérieures

- de faire une étude de la dynamique du stock de carbone en fonction d'autres paramètres climatiques comme la température ;
- Tester d'autres variables biophysiques pour améliorer la performance des modèles
- d'évaluer l'apport des animaux et de la microfaune sur le stockage du carbone hors houppier et sous houppier ;
- de reproduire cette étude en saison des pluies afin de mieux appréhender l'effet saison sur le stock de carbone ;
- de comparer les effets des différentes espèces d'arbres sur le stockage du carbone du sol.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Adjila I., 2017.** Caractérisation physico-chimique de la matière organique dans la région de Noumerate (Wilaya de Ghardaia), p23.
- **Aerts R., Chapin F.S., 2000.** « The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns ». *Advance in Ecological Research*, vol. 30, pp 1-67.
- **Ågren G., Bosatta E., 1996.** «Quality: A bridge between theory and experiment in soil organic matter studies ». *Oikos*, vol. 76, pp 522-528.
- **Akpo L.E., Grouzis M., 1996.** Influence du couvert sur la régénération de quelques espèces ligneuses sahéliennes (Nord-Sénégal, Afrique occidentale). *Webbia* 50 (2), pp 247-263.
- **Amato M.A., Ladd J.N. 1992.** « Decomposition of <sup>14</sup>C-labelled glucose and legume material in soils: properties influencing the accumulation of organic residue C and microbial biomass C ». *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 24, pp 455-464.
- **Amiro B.D., MacPherson I., Desjardins R.L., Chen J.M., Liu J., 2003.** « Post-fire carbon dioxide fluxes in the western Canadian boreal forest: evidence from towers, aircraft and remote sensing ». *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 115, pp 91-107.
- **Baldock J.A., Skjemstad J.O. 2000.** « Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack ». *Organic Geochemistry*, vol. 31, pp 697-710.
- **Balesdent J., Basile-Doelsch I., Chadoeuf J., Cornu S., Fekiacova Z., Fontaine S., Guenet B., Hatté C., 2017.** Renouvellement du carbone profond des sols cultivés : une estimation par compilation de données isotopiques, 9p.
- **Balesdent J., Besnard E., Arrouays D., Chenu C., 1998.** « The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence ». *Plant and Soil*, vol. 201, no. 1, pp 49-57.
- **Bambara D., Bilgo A., Hien E., Masse D., Thiombiano A., Hien V., 2013.** Perceptions paysannes des changements climatiques et leurs conséquences socio-environnementales à Tougou et Donsin, climats sahélien et sahélo-soudanien du Burkina Faso, *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, 74, pp. 8-16.

- **Banfield G.E., Bhatti J.S., Jiang H., Apps M.J., Karjalainen T., 2002.** « Variability in regional scale estimates of carbon stocks in boreal forest ecosystems: results from west-central Alberta ». *Forest Ecology and Management*, vol. 169, pp 15-27.
- **Banville J. L., 2009.** Caractérisation des stocks de carbone de 5 types de formations végétales dans un secteur du bassin versant de la rivière Eastmain, Baie James, pp 21-93.
- **Batjes N.H., Sombroek W.G., 1997.** Possibilities of carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global Change Biology*, 3, pp 161-173.
- **Belem B., Kagambega-Mueller F., Bellefontaine R., Sorg J.P., Bloesch U., Graf E., 2017.** Assisted Natural Regeneration with Fencing in the Central and Northern zones of Burkina Faso, *Tropicultura*, 35, 2, pp 73-86.
- **Berg B., McLaugherty C., De Santo A.V., Johnson D., 2001.** « Humus buildup in boreal forests: effects of litter fall and its N concentration ». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 31, pp 988-998.
- **Bernoux M., Carvalho M.C.S., Volkoff C.B. et Cerri C.C., 2002.** Brazil's soil carbon stocks. *Soil Science Society of America Journal*, 66, pp 888-896.
- **Bernoux M., Chevallier T., 2013.** Le carbone dans les sols sèches, des fonctions multiples indispensables, 11 p.
- **Cercle Sol, Ilg H., Uri A.K., 2019.** Sol et changement climatique, 2 p.
- **Chevallier T., Razafimbelo T.M., Lardy L.C., Brossard M., 2020.** Carbone des sols en Afrique Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles, 64 p.
- **Courbois L, Masse D, Bernhard-Reversat F, Pontanier R. 1997.** « Dynamique de la décomposition des litières d'espèces ligneuses et herbacées sur les jachères naturelles et améliorées de deux terroirs du Sénégal », Racourcissement de temps de jachères, biodiversité et développement durable en Afrique Centrale (Cameroun) et en Afrique de l'ouest (Sénégal, Mali), *rapport scientifique*, pp. 29-35.
- **Dendoncker M., Vincke C., 2020.** Low topographic position enhance woody vegetation stability in the Ferlo (Senegalese Sahel). *Journal of Arid Environments* 175p.
- **Diallo M.D., Duponnois R., Guisse A., Sall S., Chotte J.L., Thioulouse J., 2006.** Biological effects of native and exotic plant residues on plant growth, microbial biomass and N availability under controlled conditions. *European Journal of Soil Biology* 42, pp 238–246.

- **Falloon P.D., Smith P., Smith J.U., Szabo J., Coleman K., Marshall S., 1998.** «Regional estimates of carbon sequestration potential: linking the Rothamsted Carbon Model to GIS databases ». *Biology and Fertility Soi/s*, vol. 27, pp 236-241.
- **FAO, 2002.** La séquestration du carbone dans le sol pour une gestion des terres, 15 p.
- **Faye A., Sarr A., Lesueur D., 2006.** Effect of Inoculation with Rhizobia on the Gum-Arabic Production of 10-Year-Old *Acacia senegal* Trees. *Arid Land Research and Management*, 20: pp 79–85.
- **Feller C., Beare M.H., 1997.** Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79 (1) : 69-116.
- **Feller C., Bernoux M., 2008.** Historical advances in the study of global terrestrial soil organic carbon sequestration. *Waste Management*, 28, pp 734-740.
- **Feng W., Plante A.F., Six J., 2013.** Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry*, 112 (1) : 81-93.
- **Flanagan P.W., Van Cleve K., 1983.** « Nutrient cycling in relation to decomposition and organic-matter quality in taiga ecosystems ». *Canadian Journal of Forest Research*, vol.13, pp 795-817.
- **Fontaine S., Barot S., Barré P., Bdioui N., Marie B., Rumpel C., 2007.** Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, **450**, pp 277-280.
- **Fujisaki K., Chapuis-Lardy L., Albrecht A., Razafimbelo T., Chotte J.L., Chevalier T., 2018.** Data synthesis of carbon distribution in particle size fractions of tropical soils: Implications for soil carbon storage potential in croplands. *Geoderma*, 313 : 41-51.
- **Gaudinski J.B., Trumbore S.E., Davidson E.A., Zheng S.H., 2000.** « Soil carbon cycling in a temperate forest: radiocarbon based estimates of residence times, sequestration rates and partitioning of fluxes ». *Biogeochemistry*, vol. 51, pp 33-69.
- **Giardina C.P, Ryan M.G., Hubbard R.M., Binkley D., 2001.** «Tree species and soil texture controls on carbon and nitrogen mineralization rates ». *Soil Science Society of America Journal*, vol. 65, pp 1272-1279.
- **GIEC, 2007.** Bilan des changements climatiques : Rapport de synthèse 60 p.
- **Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2003.** Le Sol vivant. 2e éd. rev. et augm. Coll. «Gérer l'environnement», Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 568 p.

- **Gower S.T., Vogel J.G., Norman J.M., Kucharik C.J., Steele S.J., Stow T.K. 1997.** «Carbon distribution and aboveground net primary production in aspen, jack pine, and black spruce stands in Saskatchewan and Manitoba, Canada ». *Journal of Geophysical Research*, vol. 102 (24D), pp 29029-29041.
- **Grinand C., Rajaonarivo A., Bernoux M., Pajot V., Brossard M., Razafimbelo T., Albrecht A., Le Martret H., 2009.** Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Étude et Gestion des Sols*, Volume 16, 5, pp 23-33.
- **Grouzis M., Albergel J., 1989.** Du risque climatique à la contrainte écologique. Incidence de la sécheresse sur les productions végétales et le milieu au Burkina Faso. In : Eldin M. et Milleville P. (Eds). Le risque en agriculture. *Orstom, Coll. à Travers champs*, Paris, France. 260 p.
- **Harmon M.E., Krankina O.N., Yatskov M., Matthews E., 2001.** « Predicting broad-scale carbon stores of woody detritus from plot-level data ». In Assessment methods for soil carbon, sous la dir. de R. Lal, J. Kimble et B.A. Stewart, New York: *CRC Press, Taylor and Francis Group*, pp 533-52.
- **Henry M., Belem M., D'Annunzio R., Bernoux M., 2020.** Carbone des sols en Afrique Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles, pp 35-56.
- **Henry M., Valentini R., Bernoux M., 2009.** Soil carbon stocks in ecoregions of Africa. *Biogeosciences for discussions*, 6 : 797-823.
- **Hien E., Ganry F., Hien V., Oliver R., 2003.** Dynamique du carbone dans un sol de savane du sud-ouest Burkina sous l'effet de la mise en culture et des pratiques culturales. In : Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque Garoua, Cameroun. Cirad-Prasac, p11.
- **Higgins I.S., Shackleton M.C., Robinson R.E., 1999.** Changes in woody community structure and composition under contrasting land use systems in semi-arid savanna, South Africa, *J. Biogeogr*, 26, pp. 619-627.
- **Hobbie S.E., Ogdahl M., Chorover J., Chadwick O.A., Oleksyn J., Zytowskiak R., Reich P.B., 2007.** « Tree species effect on soil organic matter dynamics: The role of soil cation composition ». *Ecosystems*, vol. 10, pp 999-1018.
- **Ifo S.A. 2010.** Apports de carbone au sol et stocks dans deux types forestiers (forêt galerie et forêt secondaire) des plateaux Téké. Thèse de doctorat, Université Marien N'GOUABI, 194p.

- **Ifo S.A. 2017.** Variation Of  $\delta^{13}\text{C}$  and soil organic carbon dynamics in the savannah of plateau bateke, Congo Bassin. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 6 (1): 181-185.
- **Ifo S.A., Moundaga R.A., Yoka J., 2022.** Estimation des stocks de carbone organique dans les sols sous savane à *Hyparrhenia diplandra* (Hack) Steppe et forêt de terre ferme à *Petersianthus macrocarpus* (P. Beauv.) Liben dans la localité de Komono, département de la Lékoumou (République du Congo), / *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 16(5): 2436-2447.
- **Jobbagy E.G., Jackson R.B., 2000.** « The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation ». *Ecological Applications*, vol. 10, pp 423-436.
- **Keiluweit M., Bougoure J.J., Nico P.S., Pett-Ridge J., Weber P.K., Kleber M. 2015.** Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. *Nature Climate Change*, 5: pp 588–595.
- **Kermorvant C, 2022.** Tuto-Machine Learning Supervisé. Disponible sur le site [https://rpubs.com/ckermorv/Tuto\\_Machine\\_Learning\\_Supervised](https://rpubs.com/ckermorv/Tuto_Machine_Learning_Supervised) (Consulté en Mai 2023)
- **Kono D.L., Essono M.D., Ambombo E.M., Mbarga Bindzi A.M., Biye H.E., 2020.** Influence des facteurs biotopiques sur les stocks de carbone des marécages à herbacées de la ville de Yaoundé (Cameroun) et ses environs. *Afrique science*, 16(6) : 1-13.
- **Lai R. 2005.** « Forest soils and carbon sequestration ». *Forest Ecology and Management*, vol. 220, pp 242-258.
- **Lefèvre C., Rekik F., Alvantara V., Wiese L., 2017.** Carbone organique du sol, une richesse invisible, pp : 13- 50.
- **Lorenz K., Lal R. 2016.** Soil Organic Carbon - An appropriate Indicator to Monitor Trends of Land and Soil Degradation within the SDG Framework? 15 p.
- **Malhi Y., Baldocchi D.D., Jarvis P.G., 1999.** « The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests ». *Plant-Cell and EnvirOfiment*, vol. 22, no. 66, pp 715-740.
- **Matus F.J., Lusk C.H., Maire C.R., 2008.** « Effects of soil texture, carbon input rates, and litter quality on free organic matter and nitrogen mineralization in chilean rain forest and agricultural soils ». *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 39, pp 187-201.

- **Miltz J., Don A., 2012.** Optimising Sample Preparation and near Infrared Spectra Measurements of Soil Samples to Calibrate Organic Carbon and Total Nitrogen Content. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 20(6): pp 695-706.
- **Ndzai S. F., 2020.** Mémoire de master : Comparaison entre les forêts tropicales adultes et les forêts secondaires de l'axe Impfondo-Dongou, Département de la Likouala, République du Congo. Consulté en mars 2023 et disponible sur le site <https://www.memoireonline.com/05/23/14111/>
- **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), *Journal of Applied Biosciences* 66, pp 5008 – 5023.
- **N’goran A.A, 2018.** Influence des arbres sur les teneurs en carbone et azote du sol dans la zone sylvopastorale du Sénégal, pp 15-19.
- **OCDE, 2009.** Adaptation au changement climatique et coopération pour le développement, pp 69-73.
- **ONU, 2022.** Rapport sur les pays les moins avancés : La transition vers une économie sobre en carbone et ses conséquences redoutables pour la transformation structurelle, 17 p.
- **Ouedraogo A., Barbier B., Kabore P.N., , Ouoba P., Kiema A., Some L., 2019.** Perceptions du changement climatique, impacts environnementaux et stratégies endogènes d’adaptation par les producteurs du Centre-nord du Burkina Faso, 2 p.
- **Ouédraogo A., Thiombiano A., 2012.** Regeneration pattern of four threatened tree species in Sudanian savannas of Burkina Faso, *Agroforestry Systems*, 86, pp. 35-48.
- **Paradis R. 2016.** Distribution spatiale du carbone organique et de l'azote dans les sols en fonction des zones de récurrence d'inondation. Mémoire de Master. Université du Québec à trois-rivières, p124.
- **Paré D., Bergeron T., 1996.** « Effect of colonizing tree species on soil nutrient availability in a clay soil of the boreal mixedwood ». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 26, no. 6, pp 1022-1031.
- **Parton W.J., Schimel D.S., Cole C.V., Ojima D.S., 1987.** « Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands ». *Soil Science society of America Journal*, vol. 51, pp 1173-1179.

- **Paul K.I., Poiglase P.J., Nyakuengama I.G., Khanna P.K., 2002.** « Change in soil carbon following afforestation». *Forest Ecology and Management*, vol. 168, pp 241-257.
- **Peltoniemi M., Makipaa R., Liski J., Tamminen P., 2004.** « Changes in soil carbon with stand age - an evaluation of a modeling method with empirical data ». *Global Change Biology*, vol. 10, pp 2078-2091.
- **Plante A.F., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K., Six J. 2006.** « Acid hydrolysis of easily dispersed and micro aggregate-derived silt and clay-sized fractions to isolate a resistant fraction of soil organic matter». *European Journal of Soil Science*, vol. 57, pp 456-467.
- **Plante A.F., McGi11 W.B., 2002.** « Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory soil with differing simulated tillage frequencies ». *Soil and Tillage Research*, vol. 66, no. 1, pp 79-92.
- **PNUD, 2008.** Le renforcement des capacités : l’habilitation des gens et des institutions, pp 30-32.
- **Quideau S.A., Chadwick O.A., Benesi A., Graham R.C., Anderson M.A., 2001.** « A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition ». *Geoderma*, vol. 104, no. 1-2, pp 41-60.
- **Raich J.W., Tufekcioglu A., 2000.** « Vegetation and soil respiration: Correlations and controls». *Biogeochemistry*, vol. 48, pp 71-90.
- **Rakotonarivo S., 2010.** Les stocks de carbone de la biomasse aérienne et du sol selon la distribution altitudinale et le mode d’usage des terres en climat tropical humide et semi-aride. Cas de la région de Taolagnaro, Madagascar. Mémoire de DEA, université d’Antananarivo, Madagascar. 103 p.
- **Robert M., 2002.** La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres. World Soil Resources Reports-FAO 96, Rome, Italie, 75 p.
- **Saïdou A., Dossa A.F.E., Gnanglè P.C., Balogoun I., Aho N., 2012.** Evaluation du stock de carbone dans les systèmes agroforestiers à karité (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn.) et à néré (*Parkia biglobosa* Jacq. G. Don) en zone Soudanienne du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB)*, ISSN sur papier (on hard copy) : 1025-2355.

- **Salomé C., Nunan N., Pouteau V., Lerch T.Z., Chenu C., 2010.** Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms. *Global Change Biol.* , 16, pp 416-426.
- **Sana S., 2018.** Evaluation de stocks de carbone dans un sol ferrugineux sous l'apport de composts de déchets urbains : cas de Gampèla au Burkina, 15p.
- **SAP, 2022.** Qu'est-ce que le Machine Learning? Disponible sur le site <https://www.sap.com/france/products/artificial-intelligence/what-is-machine-learning.html> (Consulté en Mai 2023)
- **SAS, 2023.** Analyse prédictive, rôle et atouts. Disponible sur [https://www.sas.com/fr\\_fr/insights/analytics/predictive-analytics.html](https://www.sas.com/fr_fr/insights/analytics/predictive-analytics.html) (Consulté en Mai 2023)
- **Schimel D.S., Braswell B.H., Holland E.A., McKeown R., Ojima D.S., Painter T.H., Parton W.J., Townsend A.R., 1994.** « Climatic, edaphic and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils ». *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 8, pp 279-293.
- **Schjonning P., Thomsen I.K., Moberg J.P., De Jonge H, Kristensen K., Christensen B.T. 1999.** « Turnover of organic matter in differently textured soils: I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils ». *Geoderma*, vol. 89, pp 177-198.
- **Schmidt M., Noack A. 2000.** Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(3): pp 777-793.
- **Shepherd K., Walsh M., 2002.** Development of Reflectance Spectral Libraries for Characterization of Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3): pp 988-998.
- **Six J., Elliott E.T., Paustian K., 2000.** « Soil macroaggregate tum over and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture ». *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 32, pp 2099-2103.
- **Sombroek W.G., Nachtergaele F.O., Hebel A., 1993.** « Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils ». *Ambio*, vol. 22, pp 417-426.
- **Stancioff A., Staljanssens M., Tappan G., 1986.** Mapping and Remote Sensing of the Resources of the Republic of Senegal: A study of the geology, hydrology, soils,

vegetation and land use potential. SDSU, Remote Sensing Institute, SDSU-RSI-86-01, 655p.

- **Tappan G.G., Sall M., Wood E.C., Cushing M., 2004.** Ecoregions and land cover trends in Senegal, pp 4-30.
- **Thomsen I.K., Schjonning P., Jensen B., Kristensen K., Christensen B.T. 1999.** « Turnover of organic matter in differently textured soils. II. Microbial activity as influenced by soil water regimes ». *Geoderma*, vol. 89, pp 199-218.
- **Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad, J.O., 2006.** Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131(1-2): 59-75.
- **Von Lützw M., Kögel-Knabner L., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., Flessa H., 2006.** Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science*, 57: 426-445.

## ANNEXES

### *Annexe 1 : Stocks de carbone par site*

<i>Sites</i>	<i>Stock C HH</i>	<i>Stock C SH</i>	<i>Stock site</i>
<i>C1L5</i>	11.02	13.90	11.52
<i>C23L2</i>	7.95	12.48	8.40
<i>C2L1</i>	13.54	13.65	13.55
<i>C2L2</i>	23.85	22.83	23.55
<i>C2L3</i>	8.57	15.05	9.06
<i>C2L4</i>	7.59	10.54	7.72
<i>C2L5</i>	10.00	13.04	10.18
<i>C2L6</i>	10.85	19.48	12.82
<i>C2L7</i>	11.62	9.58	11.43
<i>C2L8</i>	20.08	21.66	20.37
<i>C3L1</i>	10.95	11.29	10.98
<i>C3L2</i>	12.79	14.80	13.14
<i>C3L4</i>	15.13	21.52	15.99
<i>C3L5</i>	12.29	18.01	15.17
<i>C3L6</i>	16.29	18.92	16.71
<i>C3L7</i>	14.05	15.37	14.15
<i>C3L8</i>	18.26	18.14	18.23
<i>C4L1</i>	7.71	10.40	7.79
<i>C4L3</i>	13.47	22.15	16.97
<i>C4L5</i>	7.70	11.24	8.11
<i>C4L7</i>	29.96	27.85	29.56
<i>C4L8</i>	23.83	27.01	25.11
<i>C5L1</i>	19.17	21.15	20.02
<i>C5L2</i>	32.64	34.01	33.27
<i>S101</i>	42.80	42.71	42.79
<i>S102</i>	14.41	17.76	17.66
<i>S201</i>	17.57	27.40	18.58
<i>S202</i>	60.30	49.29	50.15
<i>S401</i>	12.16	14.68	12.74
<i>S601</i>	21.82	19.66	21.68

S801	43.26	75.66	46.76
S802	43.35	60.66	56.38

**Annexe 2: Données facteurs environnementaux**

Sites	Longitude	Latitude	Dem moyenne (en m)	Pluviométrie annuelle moyenne (mm)	Biomasse moyenne ( kg/ha)
C1L5	426120.00	1668215.00	59.00	433.00	3147.35
C23L2	514045.00	1740936.00	55.00	342.00	1739.64
C2L1	461705.00	1803836.00	30.00	229.00	584.28
C2L2	465983.00	1780523.00	43.00	258.00	1387.24
C2L3	470287.00	1751718.00	50.00	332.00	1613.28
C2L4	469257.00	1724948.00	38.00	441.00	1793.12
C2L5	478150.00	1684146.00	54.00	456.00	2831.59
C2L6	504625.00	1627000.00	52.00	500.00	2729.35
C2L7	487020.00	1589880.00	49.00	516.00	2933.69
C2L8	477451.00	1570385.00	35.00	563.00	4263.19
C3L1	557124.00	1811353.00	25.00	265.00	998.90
C3L2	552444.00	1778905.00	50.00	300.00	1227.35
C3L4	584284.00	1723765.00	62.00	380.00	775.25
C3L5	544857.00	1685438.00	53.00	444.00	1971.80
C3L6	562580.00	1621742.00	51.00	475.00	2856.59
C3L7	558551.00	1588580.00	52.00	507.00	3564.94
C3L8	580812.00	1538826.00	51.00	687.00	4384.00
C4L1	609646.00	1781556.00	23.00	305.00	980.54
C4L3	636733.00	1707978.00	73.00	383.00	948.96
C4L5	658355.00	1633921.00	64.00	617.00	2537.08
C4L7	644740.00	1549187.00	51.00	702.00	4558.67
C4L8	641561.00	1495092.00	58.00	850.00	5478.25
C5L1	723251.00	1657297.00	87.00	521.00	2842.72
C5L2	736468.00	1566830.00	87.00	682.00	4110.25

<i>S101</i>	520986.00	1432509.00	33.00	1060.00	10747.56
<i>S102</i>	524155.00	1433543.00	56.00	1045.00	9090.80
<i>S201</i>	512164.00	1417496.00	25.00	1175.00	8162.07
<i>S202</i>	512517.00	1417146.00	29.00	1175.00	8729.30
<i>S401</i>	692498.00	1453369.00	43.00	889.00	9311.60
<i>S601</i>	820866.00	1378429.00	194.00	1220.00	9809.25
<i>S801</i>	799109.00	1385954.00	134.00	1333.00	6979.59
<i>S802</i>	795518.00	1372658.00	262.00	1429.00	10918.91

**Annexe 3: Corrélation entre les facteurs climatiques, les caractéristiques ligneuses et les stocks de carbone aux sites du CSE**

	Long	Lat	Stock HH	Stock SH	Stock sites	Dem	Pluvio	Biomasse	T de couv	Densite
<i>Long</i>	1	-0.37	0.49	0.54	0.52	0.60	0.51	0.28	0.28	0.58
<i>Lat</i>	-0.37	1	-0.54	-0.51	-0.54	-0.41	-0.95	-0.94	-	-0.58
<i>Stock HH</i>	0.49	-0.54	1	0.91	0.99	0.37	0.55	0.58	0.58	0.52
<i>Stock SH</i>	0.54	-0.51	0.91	1	0.95	0.53	0.53	0.50	0.50	0.61
<i>Stock sites</i>	0.52	-0.54	0.99	0.95	1	0.43	0.56	0.57	0.57	0.60
<i>Dem</i>	0.60	-0.41	0.37	0.53	0.43	1	0.45	0.31	0.31	0.43
<i>Pluvio</i>	0.51	-0.95	0.55	0.53	0.56	0.45	1	0.92	0.92	0.60
<i>Biomasse</i>	0.28	-0.94	0.58	0.50	0.57	0.31	0.92	1	1	0.47
<i>T de_couv</i>	0.28	-0.94	0.58	0.50	0.57	0.31	0.92	1	1	0.47
<i>Densite</i>	0.58	-0.58	0.52	0.61	0.60	0.43	0.60	0.47	0.47	1

**Annexe 4: Corrélation entre les facteurs climatiques, les caractéristiques ligneuses et les stocks de carbone aux sites du Sud**

	Long	Lat	Stock HH	Stock SH	Stock sites	Dem	Pluvio	Biom asse	T_de couv	Densite
Long	1	-0.69	-0.02	0.30	0.17	0.85	0.51	0.04	-0.34	-0.04
Lat	-0.69	1	-0.36	-0.56	-0.52	-0.86	-0.94	-0.02	0.09	-0.19
Stock HH	-0.02	-0.36	1	0.80	0.93	0.14	0.52	0.04	0.30	0.21
Stock SH	0.30	-0.56	0.80	1	0.90	0.37	0.74	-0.21	0.06	0.18
Stock sites	0.17	-0.52	0.93	0.90	1	0.39	0.69	0.15	0.29	0.34
Dem	0.85	-0.86	0.14	0.37	0.39	1	0.75	0.32	0.00	0.33
Pluvio	0.51	-0.94	0.52	0.74	0.69	0.75	1	-0.05	0.06	0.32
Biom asse	0.04	-0.02	0.04	-0.21	0.15	0.32	-0.05	1	0.20	0.24
T de couv	-0.34	0.09	0.30	0.06	0.29	0.00	0.06	0.20	1	0.92
Densit e	-0.04	-0.19	0.21	0.18	0.34	0.33	0.32	0.24	0.92	1

**Annexe 5: Liste des espèces recensées dans les sites du CSE et leur abondance**

Sites	Espèces	Nombre d'individus/espèce	Total individus/site	Surface (km <sup>2</sup> )
CIL5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	25	29	0.5
	<i>Combretum glutinosum</i>	1		0.5
	<i>Acacia raddiana</i>	1		0.5
	<i>Bauhinia rufescens</i>	1		0.5
	<i>Combretum micranthum</i>	1		0.5

C23L2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	3	12	0.5
	<i>Combretumglutinosum</i>	2		0.5
	<i>Sclerocaryabirrea</i>	6		0.5
	<i>Boscia senegalensis</i>	1		0.5
C2L1	<i>Boscia senegalensis</i>	77	80	0.5
	<i>Balanites aegyptiaca</i>	2		0.5
	<i>Leptadeniapyrotechnica</i>	1		0.5
C2L2	<i>Boscia senegalensis</i>	19	53	0.5
	<i>Acacia raddiana</i>	2		0.5
	<i>Balanites aegyptiaca</i>	29		0.5
	<i>Combretumglutinosum</i>	1		0.5
	<i>Sclerocaryabirrea</i>	1		0.5
	<i>Ziziphus mauritiana</i>	1		0.5
C2L3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	4	11	0.5
	<i>Combretumglutinosum</i>	2		0.5
	<i>Sclerocaryabirrea</i>	5		0.5
C2L4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	4	10	0.5
	<i>Combretumglutinosum</i>	6		0.5
C2L5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	11	17	0.5
	<i>Combretumglutinosum</i>	2		0.5
	<i>Combretummicranthum</i>	2		0.5
	<i>Guiera senegalensis</i>	2		0.5
C2L6	<i>Combretumglutinosum</i>	26	43	0.25
	<i>Combretumnigricans</i>	2		0.25
	<i>Grewia bicolor</i>	6		0.25
	<i>Guiera senegalensis</i>	6		0.25
	<i>Sterculiasetigera</i>	2		0.25
	<i>Strychnos spinosa</i>	1		0.25
C2L7	<i>Combretumglutinosum</i>	1	49	0.25
	<i>Guiera senegalensis</i>	48		0.25
C2L8	<i>Combretumglutinosum</i>	22	70	0.25
	<i>Guiera senegalensis</i>	39		0.25
	<i>Acacia seyal</i>	3		0.25

	<i>Adansoniadigitata</i>	1		0.25
	<i>Anogeissusleiocarpa</i>	1		0.25
	<i>Combretummicranthum</i>	1		0.25
	<i>Piliostigmareticulatum</i>	3		0.25
C3L1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	26	29	0.5
	<i>Capparisdecidua</i>	1		0.5
	<i>Acacia raddiana</i>	2		0.5
C3L2	<i>Boscia senegalensis</i>	54	94	0.5
	<i>Calotropisprocera</i>	4		0.5
	<i>Grewia bicolor</i>	6		0.5
	<i>Guiera senegalensis</i>	25		0.5
	<i>Leptadeniapyrotechnica</i>	2		0.5
	<i>Pterocarpus lucens</i>	1		0.5
	<i>Ziziphus mauritiana</i>	2		0.5
C3L4	<i>Boscia senegalensis</i>	12	78	0.5
	<i>Combretumglutinosum</i>	1		0.5
	<i>Grewia bicolor</i>	3		0.5
	<i>Guiera senegalensis</i>	51		0.5
	<i>Pterocarpus lucens</i>	9		0.5
	<i>Dalbergia melanoxylon</i>	2		0.5
C3L5	<i>Boscia senegalensis</i>	9	71	0.25
	<i>Combretumglutinosum</i>	1		0.25
	<i>Pterocarpus lucens</i>	47		0.25
	<i>Adeniumobesum</i>	4		0.25
	<i>Combretummicranthum</i>	7		0.25
	<i>Commiphoraafricana</i>	1		0.25
	<i>Guiera senegalensis</i>	2		0.25
C3L6	<i>Combretumglutinosum</i>	52	58	0.25
	<i>Grewia bicolor</i>	6		0.25
C3L7	<i>Combretumglutinosum</i>	30	32	0.25
	<i>Grewia bicolor</i>	1		0.25
	<i>Maeruaangolensis</i>	1		0.25
C3L8	<i>Combretumglutinosum</i>	40	55	0.25

	<i>Dichrostachysglomerata</i>	1		0.25
	<i>Feretiaapodanthera</i>	2		0.25
	<i>Piliostigmareticulatum</i>	1		0.25
	<i>Sterculiasetigera</i>	1		0.25
	<i>Acacia macrostachya</i>	10		0.25
C4L1	<i>Boscia senegalensis</i>	43	47	0.5
	<i>Calotropisprocera</i>	3		0.5
	<i>Balanites aegyptiaca</i>	1		0.5
C4L3	<i>Adeniumobesum</i>	1	95	0.25
	<i>Boscia senegalensis</i>	19		0.25
	<i>Grewia bicolor</i>	5		0.25
	<i>Guiera senegalensis</i>	51		0.25
	<i>Pterocarpus lucens</i>	10		0.25
	<i>Combretumglutinosum</i>	9		0.25
C4L5	<i>Adeniumobesum</i>	2	48	0.25
	<i>Combretumglutinosum</i>	18		0.25
	<i>Grewia bicolor</i>	2		0.25
	<i>Guiera senegalensis</i>	24		0.25
	<i>Boscia senegalensis</i>	1		0.25
	<i>Combretumnigricans</i>	1		0.25
C4L7	<i>Acacia macrostachya</i>	3	51	0.25
	<i>Combretumglutinosum</i>	33		0.25
	<i>Gardeniaternifolia</i>	2		0.25
	<i>Grewia bicolor</i>	1		0.25
	<i>Maytenus senegalensis</i>	5		0.25
	<i>Pterocarpus erinaceus</i>	1		0.25
	<i>Terminaliaavicennioides</i>	4		0.25
	<i>Combretumnigricans</i>	1		0.25
	<i>Lanneaacida</i>	1		0.25
C4L8	<i>Combretumglutinosum</i>	26	138	0.25
	<i>Combretumnigricans</i>	5		0.25
	<i>Cordylapinnata</i>	3		0.25
	<i>Crossopteryxfebrifuga</i>	14		0.25

	<i>Guiera senegalensis</i>	2		0.25
	<i>Hexalobusmonopetalus</i>	9		0.25
	<i>Pterocarpus erinaceus</i>	2		0.25
	<i>Securidacalolongepedunculat a</i>	1		0.25
	<i>Strychnos spinosa</i>	46		0.25
	<i>Terminaliaavicennioides</i>	13		0.25
	<i>Acacia macrostachya</i>	2		0.25
	<i>Bombax costatum</i>	3		0.25
	<i>Commelinaleiocarpa</i>	7		0.25
	<i>Gardeniaternifolia</i>	1		0.25
	<i>Sterculiasetigera</i>	2		0.25
	<i>Vitex doniana</i>	1		0.25
	<i>Xeroderrisstuhlmannii</i>	1		0.25
C5L1	<i>Adeniumobesum</i>	2	83	0.25
	<i>Combretumglutinosum</i>	35		0.25
	<i>Grewia bicolor</i>	2		0.25
	<i>Grewiaflavescens</i>	1		0.25
	<i>Guiera senegalensis</i>	43		0.25
C5L2	<i>Acacia macrostachya</i>	10	64	0.25
	<i>Combretumglutinosum</i>	38		0.25
	<i>Combretumnigricans</i>	3		0.25
	<i>Commelinaleiocarpa</i>	1		0.25
	<i>Cordylapinnata</i>	2		0.25
	<i>Maytenus senegalensis</i>	1		0.25
	<i>Sterculiasetigera</i>	1		0.25
	<i>Stereospermumkunthianum</i>	2		0.25
	<i>Bombax costatum</i>	2		0.25
	<i>Bosciaangustifolia</i>	1		0.25
	<i>Combretummicranthum</i>	2		0.25
	<i>Hexalobusmonopetalus</i>	1		0.25

*Annexe 6: Liste des espèces présentes aux sites du Sud et leur abondance*

<i>Sites</i>	<i>Espèces</i>	<i>Nombre ind / espèce</i>	<i>Total ind / site</i>	<i>Surface (m<sup>2</sup>)</i>
<i>S101</i>	<i>Prosopis africana</i>	3	3	2500
<i>S102</i>	<i>Bombax costatum</i>	2	89	900
	<i>Burkeaafricana</i>	3		900
	<i>Ceibapentandra</i>	1		900
	<i>Combretumglutinosum</i>	20		900
	<i>Cordylapinnata</i>	9		900
	<i>Lanneamicrocarpa</i>	1		900
	<i>Oxytenantheraabyssinica</i>	44		900
	<i>Pterocarpus erinaceus</i>	8		900
	<i>Terminaliamacroptera</i>	1		900
<i>S201</i>	<i>Eleaisguineensis</i>	4	4	900
<i>S202</i>	<i>Burkeaafricana</i>	2	57	900
	<i>Cassia sieberiana</i>	1		900
	<i>Combretum cf. nigricans</i>	2		900
	<i>Combretumcollinum</i>	13		900
	<i>Combretumglutinosum</i>	4		900
	<i>Cordylapinnata</i>	5		900
	<i>Crossopteryx febrifuga</i>	1		900
	<i>Grewiaflavescens</i>	1		900
	<i>Holarrhenafloribunda</i>	4		900
	<i>Lanneamicrocarpa</i>	3		900
	<i>Parkiabiglobosa</i>	2		900
	<i>Pliostigmathonnighii</i>	1		900
	<i>Terminaliamacroptera</i>	1		900
	<i>Vitex madiensis</i>	17		900
<i>S401</i>	<i>Combretumglutinosum</i>	6	8	900
	<i>Pterocarpus erinaceus</i>	1		900
	<i>Terminaliamacroptera</i>	1		900
<i>S601</i>	<i>Acacia macrostachya</i>	2	15	2500
	<i>Combretumglutinosum</i>	7		2500

	<i>Combretummicranthum</i>	1		2500
	<i>Combretumsp.</i>	1		2500
	<i>Lanneaacida</i>	2		2500
	<i>Lanneavelutina</i>	2		2500
S801	<i>Annona senegalensis</i>	1	15	900
	<i>Combretumglutinosum</i>	7		900
	<i>Combretumsp.</i>	3		900
	<i>Cordylapinnata</i>	1		900
	<i>Pterocarpus erinaceus</i>	2		900
	<i>Terminaliamacroptera</i>	1		900
S802	<i>Annona senegalensis</i>	5	94	900
	<i>Bobgunniamadagascariensis</i>	2		900
	<i>Bombax costatum</i>	1		900
	<i>Burkeaafricana</i>	2		900
	<i>Combretumglutinosum</i>	12		900
	<i>Combretumsp.</i>	48		900
	<i>Lanneavelutina</i>	2		900
	<i>Maytenus senegalensis</i>	9		900
	<i>Piliostigmahonnigii</i>	3		900
	<i>Strychnos spinosa</i>	2		900
	<i>Terminaliamacroptera</i>	5		900
	<i>Vitex madiensis</i>	3		900

**Annexe 7: Facteurs utilisés pour la modélisation**

DEM_prj _100m	FraG_prj _100m	PH_prj_ 100m	RFE_prj _100m	TEX_prj _100m	Tco_prj_ 100mm	ARG_prj _100m	CEC_pr j_100
59	23	2	433,5	9	4,6	11	13,3
56	10	2	342,0	9	3,6	11	9,7
30	5	2	229,1	9	0,8	12	10,0
42	8	2	257,8	9	3,3	10	10,0
49	13	2	332,3	9	7,7	17	13,0

39	11	2	436,6	9	4,1	4	8,0
----	----	---	-------	---	-----	---	-----

**Annexe 8 : Exemple du code R de modélisation du stock de carbone sous-houppier avec l’algorithme Random Forest**

```
#Package R pour la modelisation du carbone du sol dans le Ferlo#####
#Auteur : A. Aziz Diouf et Diry Diop
#Date : septembre 2023#####
library(pacman)
p_load(writexl,raster,rgdal,randomForest,readxl,rflUtilities, e1071, caret)

#Importer la table des donnees carbone
Tab_SOC <- read.csv('D:/MyCarbon/Table/Variable_Envi_fin/csv', header = TRUE, sep = ",", dec = ".")
Tab_SOC <- na.omit(Tab_SOC)
head(Tab_SOC)
#####

#Script du modele Random Forest (RF)#####
#1# Calibrer le modele RF
set.seed(432)
rf_model <- randomForest(formula=SOC_SH~., data=Tab_SOC[, -c(1:4,6)], ntree=500)
rf_model

train_control = trainControl(method = "cv", number = 5)
set.seed(432)
rf_model_tr = train(SOC_SH~., data = Tab_SOC[, -c(1:4,6)], method = "rf",
trControl = train_control, ntree=500)
#Afficher les caracteristiques du modele
print(rf_model_tr)

#2# Importer les images des variables (environnemetales) explicatives
list_images <- list.files("D:/MyCarbon/Raster", pattern="prj_100m.tif", full.names = TRUE)
list_images <- list_images[-c(8)]
```

```
lmg_varEnv <- stack(list_images)

#3# Appliquer le modele sur les variables explicatives pour estimer le stcok de carbon
SOC_site_image_rf <- raster::predict(lmg_varEnv,rf_model)

#4# Afficher la carte du stock de carbone du sol
palette <- terrain.colors(n=10)
plot(SOC_site_image_rf, col=palette, main='RF : Stock de Carbone du sol Sous Houppier')

#Fin du Script#####
```