

# **Potentiel de Sequestration de Carbone dans le Systeme Sol-Plante : Evaluation dans les Sols du Systeme Oasien du Manga (Sud-Est Nigerien)**

## **Résumé**

La capacité des sols à stocker du carbone constitue un enjeu majeur dans le contexte du changement climatique. Dans le présent travail, nous évaluons le potentiel de séquestration du carbone organique total (COT) dans le système sol-plante au sein du système oasien du Manga. L'étude porte sur plusieurs types d'occupations des sols (dunes traitées, dunes vives, parcours naturels et cuvettes) et s'appuie sur des analyses dendrométriques, des mesures de la densité apparente et des analyses chimiques du carbone organique par la méthode de Walkley & Black. Les résultats montrent que le stock de carbone varie significativement en fonction de la texture du sol, de la couverture végétale et de la densité des peuplements. Les cuvettes à eau profonde, de texture fine, présentent le plus fort potentiel de stockage pour le compartiment sol, tandis que les plantations de *Prosopis juliflora* et les parcours naturels à *Acacia radiana* offrent des stocks importants en biomasse ligneuse. Ces conclusions appuient l'importance des pratiques de restauration et de gestion durable pour optimiser la séquestration de carbone et atténuer le réchauffement climatique.

**Mots-clés : séquestration de carbone, système sol-plante, dunes, biomasse ligneuse, Manga, Niger**

## **Abstract**

The capacity of soils to store carbon is a major issue in the context of climate change. In this study, we evaluate the total organic carbon (TOC) sequestration potential in the soil-plant system within the Manga oasis system. The study focuses on several land cover types (managed dunes, active dunes, natural rangelands, and depressions) and relies on dendrometric analyses, bulk density measurements, and chemical analyses of organic carbon using the Walkley & Black method. The results show that carbon stocks vary significantly depending on soil texture, vegetation cover, and stand density. Deep, fine-textured depressions exhibit the highest storage potential for the soil compartment, while *Prosopis juliflora* plantations and *Acacia radiana* natural rangelands provide significant woody biomass stocks. These findings support the importance of restoration and sustainable management practices to optimize carbon sequestration and mitigate climate change.

**Keywords: carbon sequestration, soil-plant system, dunes, woody biomass, Manga, Niger**

## **1. Introduction**

Le sol est reconnu comme le plus important réservoir terrestre de carbone, regroupant entre 2400 et 3000 Gt C, soit le triple de la quantité de carbone contenue sous forme de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et 4,5 fois de celui contenu dans la végétation terrestre [1], [2]. Les sols émettent du CO<sub>2</sub> lors des processus de décomposition de la matière organique et en piège, à travers principalement les êtres vivants se trouvant en son sein. Le bilan de cet échange est négatif du fait qu'ils captent plus de carbone qu'ils n'en rejettent, d'où la qualification de puits de carbone. Selon le Groupe International des experts sur le climat [3], le rapport entre les émissions anthropiques annuelles de C (9,4 Gt C) et le stock de C des sols (2400 Gt C) est de l'ordre de 4‰, ce qui suggère qu'une augmentation de 4‰ par an du stock de C des sols permettrait théoriquement de compenser les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>[4]. Ainsi l'augmentation de la concentration annuelle du CO<sub>2</sub> pourrait être compensée par la réhabilitation de 2 milliards d'hectares des terres dégradées, pour accroître leur stock de carbone de 1,5 tonnes /ha. Dans les régions sahéliennes, la dégradation des terres et l'ensablement intensif révèlent la nécessité d'adopter des stratégies de restauration écologique[5]. Le système oasien du Manga, situé au sud-est du Niger, offre un cadre d'étude pertinent pour évaluer le potentiel de séquestration de carbone dans des sols d'occupations hétérogènes allant des dunes traitées aux parcours naturels en passant par les cuvettes. L'objectif général de cette étude est d'évaluer le potentiel de stockage de carbone dans le système sol-plante et de déterminer l'impact des pratiques de restauration sur l'amélioration des stocks de carbone.

## **2. Matériel et Méthodes**

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

L'étude a été réalisée dans la région du Manga au sud-est du Niger. Elle couvre les départements de Maïné-Soroa et celui de Goudoumaria dans la région de Diffa à l'extrême Sud-Est du Niger (Figure 1). La région est comprise entre le 13°05' et le 14°30' de latitude Nord et le 10°35' et le 12°30' de longitude Est. Le relief est caractérisé par des plaines et des dunes de sable, des cuvettes oasiennes et des bas-fonds. Le climat de la zone est de type saharo-sahélien marqué par une longue saison sèche (9 à 10 mois), suivie d'une saison des pluies aux précipitations courtes et violentes essentiellement durant les mois de juillet et août[6]. La zone d'étude présente une végétation de type steppique ouverte, présentant des petites unités contractées de ligneux [7]. Le cumul pluviométrique annuel à Maïné-Soroa sur la période 1990-2013 est de  $384,33 \pm 72,60$  mm, des températures présentant deux minima de 12 (décembre – Janvier) et 23°C (juillet – août) et deux maxima de 38 (octobre) et 41°C (avril – mai)[8]. L'Harmattan et la Mousson sont les deux types de vent rencontrés dans cette zone où le vent souffle presque tout le temps avec une vitesse moyenne mensuelle de 3 m/s, particulièrement érosive enregistrée de janvier à mars et de juin à juillet du fait de l'intrusion des tempêtes convectives dont les vitesses au moment de leur passage peuvent dépasser les 20 m/s[5]. Les principaux types de sols rencontrés sont des sols bruns rouges subarides, ils sont épais et de texture sableuse et, de faible fertilité, de faible teneur de matière organique et une forte carence de phosphore[9], [10].

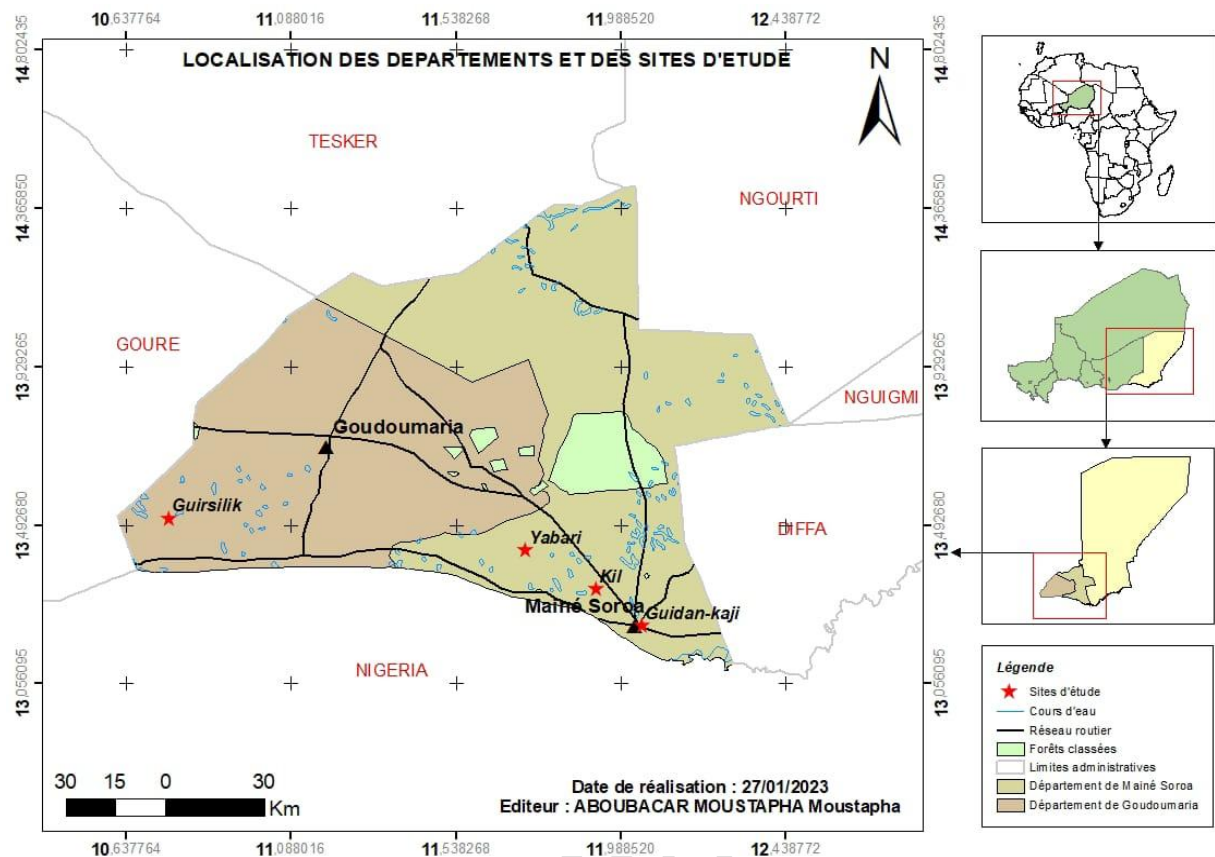


Figure 1 : Carte de localisation des sites d'étude

## 2.2. Caractéristiques des sites étudiés

Quatre types d'occupations ont été analysés :

- ◆ **Dune traitée** : plantations artificielles de *Prosopis juliflora*, de différents âges (14, 15 et 19 ans), servant d'espaces communautaires pour les pâturages secondaires.
- ◆ **Dune vive** : dunes dégradée caractérisées par une couverture végétale très limitée.
- ◆ **Parcours naturel** : zones se trouvant dans une légère dépression présentant une couverture végétale dominée par *Acacia radiana*, utilisées pour le pâturage et l'exploitation forestière non ligneuse.
- ◆ **Cuvette** : forte dépression interdunaire où le sol est de texture limono-argileuse, et la nappe phréatique peu profonde. Ce site est favorable à la pratique de l'horticulture, de la foresterie et de l'élevage. Les caractéristiques permettent une accumulation élevée de matière organique.

Un inventaire effectué au sein de 48 parcelles de 500 m<sup>2</sup>. Les paramètres mesurés sont le diamètre à hauteur de poitrine, la hauteur totale et la densité des arbres.

## 2.3. Méthode de mesure du carbone organique dans le système sol-plante

### • Méthode de mesure du carbone organique du sol (COS)

Des échantillons composites de sol ont été prélevés sur cinq horizons (0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 cm) et analysés par la méthode de Walkley & Black [11] après tamisage (<2 mm), afin d'estimer la concentration de carbone. La densité apparente a été

déterminée par la méthode du cylindre, ce qui a permis de calculer le stock de carbone (en Mg C ha<sup>-1</sup>) pour chacune des couches, puis cumulativement pour la profondeur de 0 à 100 cm.

L'équation 1a été utilisées pour le calcul du stock de carbone du sol [12].

$$COS = C/100 \times \rho \times P \times (1 - frag) \times 100 \text{ (Eq 1)}$$

$$[COS]_{\text{Sol}(0-100\text{cm})} = \sum (\text{Couche}=1) \text{ à } (\text{Couche}=5) (COS) \text{ (Eq 2)}$$

*Avec : COS : stock du carbone organique du sol (Mg C ha<sup>-1</sup>) ; C (%) : concentration du carbone organique de la fraction fine du sol (fraction < 2 mm) dans les différentes profondeurs ;  $\rho$  = Densité apparente du sol (g cm<sup>-3</sup>) ; P : épaisseur de la couche échantillonnée ; frag = pourcentage de la fraction grossière/100 ; 100 est utilisé pour convertir les unités en Mg C ha<sup>-1</sup>. A cet effet, l'équation permet de calculer le carbone stocké dans une seule couche.*

- **Biomasse ligneuse :**

- La biomasse aérienne a été estimée par des équations allométriques utilisant le diamètre à hauteur de poitrine (DHP).

L'équation généralisée développée par [13]a été utilisée pour estimer la biomasse ligneuse au-dessus du sol

$$Ya = \exp(-2,289 + (2,649 \times \log(DHP)) - (0,021 \times \log((DHP)^2)) \text{ (Eq 3)}$$

**Avec : Ya représente la biomasse ligneuse aérienne (kg) ; DHP, le diamètre à hauteur de poitrine (D1, 30m).**

- La biomasse racinaire a été obtenue par des méthodes non destructives se basant sur le modèle allométrique reliant la biomasse racinaire à la biomasse aérienne).

L'équation suivante[14]a été utilisée:

$$Yr = \exp(-1,0587 + 0,8836 \times \ln(Ya)) \text{ (Eq 4)}$$

**Avec : Yr représente la biomasse racinaire en kg et Ya = la biomasse aérienne totale au-dessus du sol en kg.**

Dans la présente étude, seules les parties aériennes et souterraines de l'arbre mesuréesont prises en compte dans la détermination de la biomasse totale à travers l'utilisation de l'équation 5. Ainsi la biomasse ligneuse totale est donnée par la formule :

$$B = Ya + Yr \text{ (Eq 5)}$$

Le contenu en carbone des biomasses a été calculé en appliquant un facteur de conversion de 50 % selon les recommandations du GIEC[3].

$$COS(\text{Plante}) = B \times Fc \text{ (Eq 6)}$$

Avec : COS représente le carbone emmagasiné dans la biomasse ligneuse (Mg C ha<sup>-1</sup>), B la biomasse (Mg C ha<sup>-1</sup>) et Fc le facteur de conversion (50 %).

- **Stock total du système sol-plante** : Il représente la somme du carbone présent dans le sol et dans la biomasse ligneuse. La formule suivante a été utilisée :

$$\text{COS}(\text{Sol-plante}) = \text{COS}(\text{sol}) + \text{COS}(\text{plante}) \quad (\text{Eq } 7)$$

## 2.4. Analyses statistiques

Les données ont été traitées à l'aide du logiciel R (version 4.0.5). La normalité des données a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk et des tests de comparaisons multiples (ANOVA One-Way, test de Duncan et tests non paramétriques de Kruskal-Wallis) ont été effectués pour comparer les moyennes entre les différents types d'occupation des sols, avec un seuil de significativité de 5 %.

## 3. Résultats

### 3.1. Caractéristiques dendrométriques et densité des peuplements

Les mesures dendrométriques montrent que les parcours naturels, dominés par *Acacia radiana*, présentent des arbres avec un DHP et une hauteur totale significativement supérieurs comparativement aux plantations artificielles de *Prosopis juliflora* sur dunes traitées. Toutefois, la densité en arbres est beaucoup plus élevée pour les dunes traitées (jusqu'à 238 pieds ha<sup>-1</sup>) que pour les parcours naturels (88 pieds ha<sup>-1</sup>).

**Tableau 1 : Caractéristiques dendrométriques des ligneux des dunes traitées et du parcours naturels étudiés**

Occupations de sols	Densité (Pieds/ha)	DHP (cm)	Ht(m)	Espèces dominantes
DT (19ans)	238a ±56	13,22b±7,47	3,91b±1,15	Prosopis juliflora
DT (15 ans)	143c ±10	13,05b±7,76	3,47c±1,52	Prosopis juliflora
DT (14 ans)	178b ±39	13,40b±8,60	3,26c±0,33	Prosopis juliflora
PN	88d ±28	21,86a±10,88	5,42a±1,33	Acacia radiana

**Légende :** PN : Parcours naturel ; DT : Dune traitée ; DHP : le diamètre à hauteur de poitrine (DI, 30m) ; Ht(m) : hauteur totale de l'arbre. Les valeurs affectées de la même lettre sur la même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 % selon le Duncan test.

### 3.2. Stocks de carbone du sol

Globalement, les résultats mettent en évidence une forte dépendance des stocks de carbone du sol vis-à-vis de l'occupation des terres et des caractéristiques édaphiques associées. Les milieux les plus fins et les plus humides, comme les cuvettes, favorisent l'accumulation et la stabilisation du carbone organique grâce à une meilleure rétention de l'eau, une productivité végétale plus élevée et une protection physique de la matière organique par les fractions argileuses.

À l'inverse, les milieux sableux et instables, tels que les dunes vives, limitent fortement le stockage du carbone en raison d'une faible couverture végétale, d'une production de biomasse réduite et d'une minéralisation plus rapide de la matière organique. Les parcours naturels et les dunes traitées occupent une position intermédiaire, traduisant l'effet positif mais progressif de la végétation et des actions de stabilisation sur la restauration des stocks de carbone du sol.

Dans l'ensemble, ces observations soulignent le rôle déterminant de la texture du sol, de la couverture végétale et des pratiques de gestion dans la dynamique du carbone, et confirment que les actions de restauration des dunes peuvent contribuer, à moyen terme, à l'amélioration du potentiel de séquestration du carbone des sols.

**Tableau 2: Variabilité du potentiel stock de carbone C du sol (COS) en fonction des types d'occupations des sols**

Occupations des sols	COS (Mg C ha <sup>-1</sup> )
CEP	396,93 ± 28,95 a
PN	62,41 ± 7,70 b
DT (19 ans)	57,67 ± 1,41 b
DT (15 ans)	42,27 ± 1,64 c
DT (14 ans)	42,24 ± 2,59 c
DV	28,43 ± 2,14 d
Probabilité-Signification	< 2e-16 ***HS

**Légende :** CEP : Cuvette à eau profonde ; PN : Parcours naturel ; DT (19ans) : Dune traitée âgée de 19 ans ; DT (15ans) : Dune traitée âgée de 15 ans ; DT (14ans) : Dune traitée âgée de 14 ans. Les valeurs affectées de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 % selon le Duncan test ; NS : Non Significatif ; HS : Hautement Significatif

La variabilité verticale du stock de carbone est également perceptible. Les sols des cuvettes concentrent plus de 70 % du carbone dans les horizons superficiels (0–40 cm), tandis que les dunes vives présentent une accumulation quasi uniforme en raison d'un faible enrichissement en matière organique.

**Tableau 3: Variabilité verticale des stocks de carbone du sol (COS) sous divers modes d'occupation des sols**

Occupations des sols	COS (Mg Cha <sup>-1</sup> ) 0-20cm	COS (Mg Cha <sup>-1</sup> ) 20-40cm	COS (Mg Cha <sup>-1</sup> ) 40-60cm	COS (MgCha <sup>-1</sup> ) 60-80cm	COS (MgCha <sup>-1</sup> ) 80-100cm	Probabilité Signification
DV	5,59 ± 0,80 <sup>a</sup>	5,62 ± 0,79 <sup>ab</sup>	5,64 ± 0,77 <sup>bc</sup>	5,72 ± 0,72 <sup>bc</sup>	5,74 ± 0,70 <sup>c</sup>	<b>0,013 S</b>
PN	12,71 ± 2,86 <sup>a</sup>	11,90 ± 1,22 <sup>a</sup>	12,61 ± 1,05 <sup>a</sup>	11,03 ± 0,73 <sup>a</sup>	12,17 ± 1,74 <sup>a</sup>	<b>0,445NS</b>
DT (19ans)	11,76 ± 1,92 <sup>a</sup>	11,56 ± 1,36 <sup>a</sup>	11,29 ± 2,02 <sup>a</sup>	11,22 ± 0,78 <sup>a</sup>	11,85 ± 1,27 <sup>a</sup>	<b>0,900 NS</b>
DT (15ans)	8,49 ± 0,47 <sup>a</sup>	8,43 ± 0,76 <sup>b</sup>	8,40 ± 0,76 <sup>bc</sup>	7,89 ± 0,76 <sup>cd</sup>	7,85 ± 0,39 <sup>d</sup>	<b>0,001 ***HS</b>
DT (14ans)	8,52 ± 1,41 <sup>a</sup>	8,40 ± 1,33 <sup>a</sup>	8,50 ± 1,24 <sup>a</sup>	8,53 ± 1,21 <sup>a</sup>	8,47 ± 1,19 <sup>a</sup>	<b>0,827 NS</b>
CEP	150,57 ± 1,83 <sup>a</sup>	137,01 ± 1,70 <sup>b</sup>	93,15 ± 5,26 <sup>c</sup>	10,27 ± 0,52 <sup>d</sup>	5,93 ± 0,91 <sup>e</sup>	<b>2e-16 ***HS</b>

**Légende :** CEP : Cuvette à Eau Profonde ; PN : Parcours naturel ; DT (19ans) : Dune traitée âgée de 19 ans ; DT (15ans) : Dune traitée âgée de 15 ans ; DT (14ans) : Dune traitée âgée de 14 ans. Les valeurs affectées de la même lettre sur la même ligne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 % selon le Duncan test ; NS : Non Significatif ; HS : Hautement Significatif.

### 3.3. Stocks de carbone dans la biomasse ligneuse

Les résultats indiquent que la biomasse ligneuse représente environ 70 % du carbone total enregistré. Les plantations de *Prosopis juliflora* âgées de 19 ans affichent des stocks supérieurs (environ 177 Mg C ha<sup>-1</sup>) par rapport aux plantations plus jeunes (14 et 15 ans, entre 119 et 125 Mg C ha<sup>-1</sup>) et aux parcours naturels (environ 157 Mg C ha<sup>-1</sup>). Ainsi, la

densité des peuplements et l'âge des plantations influencent fortement le potentiel de stockage de carbone dans la biomasse.

**Tableau 4: Stock de carbone dans la biomasse ligneuse aérienne et souterraine**

Occupations des sols	Stock de carbone dans la biomasse ligneuse (Mg C ha <sup>-1</sup> )
DT (19ans)	176,93 ± 2,37 a
PN	157,16 ± 9,04 b
DT (14ans)	124,72 ± 2,61 c
DT (15ans)	118,68 ± 2,37 d
Probabilité-Signification	< 1,1e-14 *** HS

*Légende : PN : Parcours naturel ; DT (19ans) : Dune traitée âgée de 19 ans ; DT (15ans) : Dune traitée âgée de 15 ans ; DT (14ans) : Dune traitée âgée de 14 ans. Les valeurs affectées de la même lettre sur la même ligne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 % selon le Duncan test ; NS : Non Significatif ; HS : Hautement Significatif.*

### 3.4. Stock total du système sol-plante

En additionnant le carbone stocké dans le sol et dans la biomasse ligneuse, la dune traitée de 19 ans atteint le stock total le plus élevé (235 Mg C ha<sup>-1</sup>), suivi des parcours naturels (218 Mg C ha<sup>-1</sup>), alors que les dunes traitées plus jeunes présentent des stocks significativement inférieurs (entre 161 et 167 Mg C ha<sup>-1</sup>).

**Tableau 5: Stock total de carbone dans le système sol-plante des dunes traitées et du parcours naturel**

Occupations des sols	Stock de carbone dans le système sol-plante (Mg C ha <sup>-1</sup> )
PN	217,57 ± 4,55 b
DT (19ans)	234,60 ± 1,41 a
DT (14ans)	166,99 ± 2,59 c
DT (15ans)	160,93 ± 1,64 d
Probabilité-Signification	< 2e-16 *** HS

*Légende : PN : Parcours naturel ; DT (19ans) : Dune traitée âgée de 19 ans ; DT (15ans) : Dune traitée âgée de 15 ans ; DT (14ans) : Dune traitée âgée de 14 ans. Les valeurs affectées de la même lettre sur la même ligne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 % selon le Duncan test ; NS : Non Significatif ; HS : Hautement Significatif.*

## 4. Discussion

Les résultats obtenus mettent en lumière l'importance des caractéristiques pédologiques et de la couverture végétale dans la séquestration du carbone.

- **Influence du type de sol** : Les sols de texture fine, notamment ceux des cuvettes, favorisent une accumulation du carbone organique grâce à leur faible aération et une moindre décomposition de la matière organique. Ce constat rejoint les observations de [15] dans d'autres contextes pédologiques.
- **Impact de la restauration** : Les dunes restaurées, où des programmes de reverdissement ont été mis en œuvre depuis des décennies, montrent une augmentation progressive des stocks de carbone, proportionnelle à l'âge des plantations. Dès lors,

au-delà de 20 ans, le potentiel de séquestration des dunes traitées est comparable à celui des parcours naturels malgré le fait que les sols ne soit pas de même texture.

- **Importance de la densité des ligneux** : La forte densité d'arbres, telle que celle observée dans les plantations de *Prosopis juliflora* (jusqu'à 238 pieds ha<sup>-1</sup>), contribue significativement au stockage de carbone, dépassant parfois les apports réalisés par des espèces présentant un DHP et une hauteur plus importante mais une densité moindre (*Acacia radiana*). Ces constatations sont en accord avec plusieurs études réalisées en zone sahélienne et dans d'autres régions présentant des conditions édaphiques similaires [16], [17], [18]. Elles soulignent par ailleurs la nécessité de prendre en compte les spécificités locales (densité, âge, texture des sols) pour développer des modèles précis d'estimation du stock de carbone.

## 5. Conclusion

L'étude démontre que la séquestration de carbone dans le système sol-plante au sein du système oasien du Manga est fortement influencée par la texture du sol, la couverture végétale et la densité des peuplements arborés. Deux points essentiels émergent :

1. Les sols de texture fine, comme ceux des cuvettes, possèdent un potentiel de stockage supérieur du fait de leur capacité à retenir la matière organique dans les horizons superficiels.
2. Dans les zones restaurées par la plantation de *Prosopis juliflora*, la densité des peuplements est un déterminant majeur du stock de carbone, et les plantations plus âgées stockent une quantité de carbone plus élevée, comparable voire supérieure à celle des parcours naturels.

Dans le système oasien du Manga, le carbone du sol des cuvettes représente un puits de carbone durable, alors que celui des dunes restaurées demeure transitoire, dépendant du maintien de la couverture végétale et des pratiques de gestion. La durabilité du carbone du sol n'est donc pas seulement une question de quantité, mais surtout de forme de stabilisation. Dans le système oasien du Manga, la plante permet de capter rapidement le carbone, mais le sol conditionne sa durabilité à long terme. Ces résultats appellent à approfondir les recherches afin de développer des modèles spécifiques de calcul pour affiner l'estimation des stocks de carbone, en particulier dans le cadre de politiques de lutte contre le changement climatique et de restauration des terres dégradées. La valorisation des cuvettes oasiennes et la gestion des jeunes forêts mono-spécifiques pourraient ainsi contribuer de manière significative à l'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub>.

## References

- [1] K. Hairiah, *Measuring carbon stocks: across land use systems : a manual*. Malang, Indonesia: Published in close cooperation with Brawijaya University and ICALRRD (Indonesian Center for Agricultural Land Resources Research and Development), 2010.
- [2] A. E. Hartemink et K. McSweeney, Éd., *Soil Carbon*. Cham: Springer International Publishing, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-04084-4.
- [3] GIEC, *Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie*. Hayama, Kanagawa, Japon: IGES, 2003.
- [4] R. Lal, « Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security », *Science*, vol. 304, n° 5677, p. 1623-1627, juin 2004, doi: 10.1126/science.1097396.



- [5] A. D. Tidjani, A. A. Touré, J. L. Rajot, B. Marticorena, et C. L. Biolders, « Flux éolien et dynamique des fronts dunaires dans le Manga, sud-est du Niger », *Rev.Ivoir.Sci.Technol*, n° 28, p. 323-332, 2016.
- [6] K. A. K. Kaou, O. L. Manzo, I. D. Guimbo, S. Karim, et R. Paul, « Diversité floristique et structure de la végétation dans la zone dunaire du sud-est du Niger : Cas de Mainé soroa », n° 120, p. 12053-12066, 2017.
- [7] I. Bio, H. Rabiou, I. Soumana, B. M. Mamoudou, et A. Mahamane, « Étude floristique des formations naturelles à *Vachellia tortilis* subsp. *raddiana* en zone sahélienne du Niger », *Rev. Marocaine Sci. Agron. Vét.*, vol. 9, n° 2, p. 230-241, 2021.
- [8] Z. Toudjani, A. Bachir, et G. Maman, « Etude sur la Dynamique de l'Ensablement dans le Département de Maïné-Soroa : CARTOGRAPHIE DES SITUATIONS DE L'ENSABLEMENT », AFVP&ONG KARKARA, Niger, 2004.
- [9] G. Bocquier et M. Gavaud, « Etude Pédologique du Niger oriental », Ministère de l'Economie Rurale, Service du Génie Rural, Niger, 1964.
- [10] J.-M. K. Ambouta, Z. Toudjani, G. Maman, et A. Bachir, « Etude sur l'inventaire et la caractérisation pédologique et hydraulique des cuvettes oasiennes dans le Département de Maïné-Soroa : Typologie des cuvettes et bas-fonds et possibilité d'exploitation agricole et de valorisation (rapport d'étude). AFVP & ONG KARKARA », AFVP&ONG KARKARA, Niger, Rapport d'étude, 2005. Consulté le: 3 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: [https://recaniger.org/IMG/pdf/Diffa\\_Typologie\\_cuvettes\\_Karkara-AFVP\\_2005.pdf](https://recaniger.org/IMG/pdf/Diffa_Typologie_cuvettes_Karkara-AFVP_2005.pdf)
- [11] A. Walkley et I. A. Black, « An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method », *Soil Sci.*, vol. 37, n° 1, p. 29-38, janv. 1934, doi: 10.1097/00010694-193401000-00003.
- [12] D. Arrouays *et al.*, « Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps », *Étude Gest. Sols*, p. 9, 2003.
- [13] M. Henry *et al.*, « Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations », *Silva Fenn.*, vol. 45, n° 3B, p. 447-569, 2011, doi: 10.14214/sf.38.
- [14] M. A. Carins, S. Brown, E. H. Helmer, et G. A. Baumgardner, « Root biomass allocation in the world's upland forests », *Oecologia*, vol. 111, n° 1, p. 1-11, juin 1997, doi: 10.1007/s004420050201.
- [15] C. Grinand *et al.*, « Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar », *Etude Gest. Sols*, p. 13, 2009.
- [16] D. Marone, « Étude du potentiel de stock de carbone d'espèces agroforestières et de leurs traits fonctionnels en lien avec les systèmes d'utilisation des terres au Sénégal », Doctorat, LAVAL, Québec, Canada, 2015.
- [17] A. Takimoto, V. D. Nair, et P. K. R. Nair, « Contribution of trees to soil carbon sequestration under agroforestry systems in the West African Sahel », *Agrofor. Syst.*, vol. 76, n° 1, p. 11-25, mai 2009, doi: 10.1007/s10457-008-9179-5.
- [18] G. X. kooke, R. K. F. M. Ali, J.-M. Djossou, et I. Toko, « Estimation du stock de carbone organique dans les plantations de *Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth. des forêts classées de Pahou et de Ouèdo au Sud du Bénin », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 13, n° 1, p. 277-293, mai 2019, doi: 10.4314/ijbcs.v13i1.23.