

Évaluation des caractéristiques chimiques des sols et quantification du carbone organique pour une gestion écologique et durable des écosystèmes dans les Provinces du Guéra, Batha et Hadjer Lamis au Tchad

[Assessment of the chemical characteristics of soils and quantification of organic carbon for the ecological and sustainable management of ecosystems in the Guéra, Batha and Hadjer Lamis provinces in Chad]

Gaiwa Daakre¹, Mbai-Asbe Bétoubam², and Azoutane Julien³

¹Centre National de Recherche pour le Développement (CNRD). BP 1228 N'Djaména, Chad

²Université de N'Djaména, Faculté des Sciences Exactes et Appliquées, Laboratoire de Botanique Systématique et d'Écologie Végétale, B.P. 1027, N'Djaména, Chad

³Département des sciences agronomiques, Faculté des sciences agropastorales et agro-industrielles (FASAPA), Université des Sciences et Technologies d'Ati (USTA), B.P. 20, Chad

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The provinces of Guéra, Batha, and Hadjer Lamis are under severe environmental pressure due to overgrazing, deforestation for fuelwood, and soil degradation, compromising essential ecosystem services. Despite the populations' dependence on these services, no up-to-date environmental monitoring system exists, limiting understanding of the dynamics of degradation. In this context, the study aims to assess soil chemical characteristics and quantify soil organic carbon (SOC) in three provinces of Chad (Guéra, Batha, and Hadjer Lamis) in order to evaluate their fertility and carbon sequestration potential. A hierarchical sampling system, based on 10 km² sentinel sites stratified into 16 clusters, was used to capture the spatial variability of the soils. The analyses show high grain size heterogeneity, with very clayey soils in Amdjamena and Bokoro (78%) and predominantly sandy soils in Temki (73%). pH values ranging from 4.94 to 10.74 indicate conditions ranging from slightly acidic to alkaline. The soils have high aluminum content, contrasting with very low levels of boron and zinc, indicating potential micronutrient deficiencies. Phosphorus, magnesium, and potassium levels are generally low, suggesting limited chemical fertility. Average nitrogen (0.04%) and COS (5.23 g kg⁻¹) concentrations confirm a marked lack of organic matter. SOC varies greatly between sites, from 0.68 to 30 g/kg, with high values in Melfi and very low values in Amdjamena and Bokoro. These results highlight limited fertility and contrasting carbon sequestration potential, requiring appropriate management approaches to restore soil health and enhance agroecological resilience.

KEYWORDS: soil chemical characteristics, soil organic carbon (SOC), sustainable ecosystem management, Chad.

RESUME: Les provinces du Guéra, Batha et Hadjer Lamis subissent une forte pression environnementale liée au surpâturage, à la déforestation pour le bois de chauffe et à la dégradation des sols, compromettant les services écosystémiques essentiels. Malgré la dépendance des populations à ces services, aucun système de suivi environnemental actualisé n'existe, limitant la compréhension des dynamiques de dégradation. Dans ce contexte, l'étude menée vise à évaluer les caractéristiques chimiques des sols et à quantifier le carbone organique des sols (COS) dans trois provinces du Tchad (Guéra, Batha et Hadjer Lamis), afin d'apprécier leur potentiel de fertilité et de séquestration du carbone. Un dispositif d'échantillonnage hiérarchique, basé sur des sites sentinelles de 10 km² stratifiés en 16 clusters, a été utilisé pour capturer la variabilité spatiale des sols. Les

analyses montrent une forte hétérogénéité granulométrique, avec des sols très argileux à Amdjamena et Bokoro (78 %) et majoritairement sableux à Temki (73 %). Les valeurs de pH, comprises entre 4,94 et 10,74, révèlent des conditions allant de légèrement acides à alcalines. Les sols présentent des teneurs élevées en aluminium, contrastant avec des niveaux très faibles en bore et zinc, indiquant des risques de déficience en micronutriments. Les teneurs en phosphore, magnésium et potassium sont généralement faibles, suggérant une fertilité chimique limitée. Les concentrations moyennes en azote (0,04 %) et en COS (5,23 g kg⁻¹) confirment une pauvreté marquée en matière organique. Le COS varie fortement entre les sites, de 0,68 à 30 g/kg, avec des valeurs élevées à Melfi et très faibles à Amdjamena et Bokoro. Ces résultats mettent en évidence une fertilité limitée et un potentiel de séquestration du carbone contrasté, nécessitant des approches de gestion adaptées pour restaurer la santé des sols et renforcer la résilience agroécologique.

MOTS-CLEFS: caractéristiques chimiques du sol, carbone organique du sol (COS), gestion durable des écosystèmes, Tchad.

1 INTRODUCTION

La gestion durable des écosystèmes sahéliens constitue un enjeu majeur dans un contexte de dégradation continue des terres, de variabilité climatique et d'augmentation de la pression anthropique. Dans ces milieux fragiles, les sols jouent un rôle central dans le maintien de la productivité agricole, la régulation des cycles biogéochimiques et la séquestration du carbone, un levier important pour l'atténuation du changement climatique (Lal, 2004; IPCC, 2006). Cependant, les sols des zones semi-arides telles que celles du Tchad sont souvent caractérisés par une faible fertilité, une forte variabilité spatiale de leurs propriétés physico-chimiques et une vulnérabilité accrue aux processus d'érosion et de dégradation (FAO, 2015; Mando *et al.*, 2005).

Le carbone organique du sol (COS) constitue l'un des indicateurs clés de la qualité et de la santé des sols. Il conditionne la stabilité structurale, la rétention hydrique, la disponibilité des éléments nutritifs et la résilience des écosystèmes face aux perturbations climatiques (Feller *et al.*, 1996; Batjes, 2014). Dans les zones sahéliennes, les niveaux de COS sont généralement faibles en raison des températures élevées, de la faible productivité végétale et de la pression croissante sur les ressources naturelles, mais ils présentent un potentiel important d'amélioration via des pratiques de gestion durable (Bayala *et al.*, 2022; Zougmoré *et al.*, 2004). Ainsi, la caractérisation du COS, associée à l'étude des paramètres chimiques du sol, constitue une étape essentielle pour orienter les stratégies de gestion écologique et les politiques de restauration des terres dégradées. Les provinces du Guéra, du Batha et du Hadjer Lamis, situées dans le centre du Tchad, représentent des zones agroécologiques contrastées marquées par une mosaïque de conditions climatiques, pédologiques et d'occupation du sol. Ces régions, majoritairement sahéliennes mais incluant aussi une zone de transition pré-soudanienne, sont soumises à une forte variabilité pluviométrique et à des systèmes de production agricole et pastorale qui influencent directement la dynamique des sols (Houérou, 2001; Bernoux *et al.*, 2002). Malgré leur importance écologique et socioéconomique, les connaissances sur la qualité des sols et le potentiel de séquestration du carbone dans ces provinces demeurent limitées.

Dans ce contexte, le présent travail vise à évaluer les caractéristiques chimiques des sols et à quantifier le carbone organique dans plusieurs sites représentatifs des provinces du Guéra, Batha et Hadjer Lamis. Plus spécifiquement, il s'agit: (i) de déterminer les principaux paramètres chimiques du sol, (ii) d'estimer les stocks de carbone organique afin d'apprécier la capacité de séquestration des sols, et (iii) d'analyser les relations entre les propriétés chimiques et le COS pour mieux comprendre les interactions régissant la fertilité et la stabilité des sols. Cette étude va apporter des connaissances scientifiques capables de soutenir une gestion écologique et durable des écosystèmes dans ces régions stratégiques du Tchad. Elle contribue ainsi à combler un déficit d'information sur la dynamique du carbone et la qualité des sols au niveau régional, tout en fournissant des éléments essentiels pour orienter les initiatives de restauration des terres, de lutte contre la désertification et d'adaptation au changement climatique.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 SITE D'ÉTUDE

L'étude a été conduite dans trois Provinces du Tchad: le Guéra (Départements d'Abtouyour, Mangalmé, Guéra et Barh Signaka), le Batha (Département du Fitri) et le Hadjer Lamis (Département de Dababa) (Figure 1). La zone d'étude se situe majoritairement en zone sahélienne, caractérisée par un climat semi-aride, une végétation steppique et une forte variabilité pluviométrique. Toutefois, la partie sud, notamment le Département de Barh Signaka dans la Province du Guéra, appartient à

la zone de transition pré-soudanienne, où les conditions climatiques et écologiques deviennent progressivement plus humides et diversifiées.

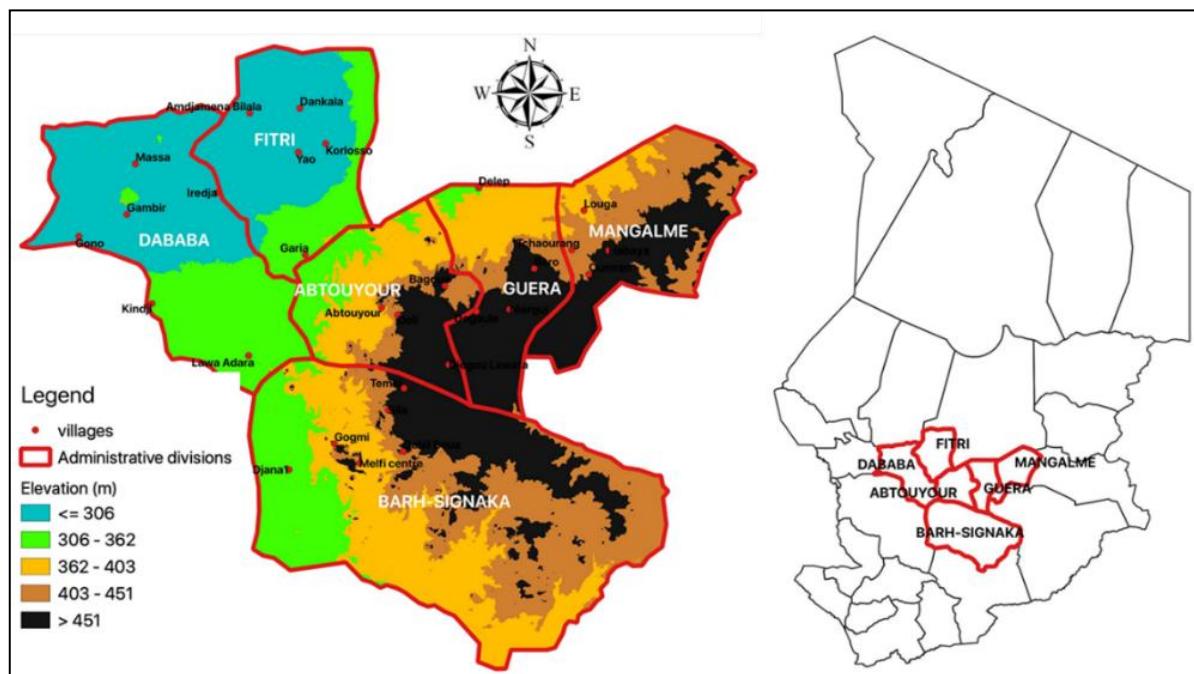


Fig. 1. Carte de la zone d'étude

2.2 MÉTHODOLOGIE

Le cadre d'échantillonnage repose sur une approche hiérarchique combinant une enquête de terrain structurée et un protocole d'échantillonnage spatial basé sur des sites sentinelles de 10 km^2 conformément aux méthodologies recommandées pour les systèmes de surveillance environnementale (Shepherd & Walsh, 2002; Vagen *et al.*, 2010). Chaque site sentinelle est stratifié en 16 clusters, suivant le principe de la stratification spatiale en grappe permettant de capturer la variabilité biophysique locale (Brown, 2002; FAO, 2006). Les points d'observation sont ensuite distribués aléatoirement au sein de chaque cluster, conformément aux approches d'échantillonnage probabiliste utilisées dans les inventaires pédologiques et les évaluations du carbone des sols (IPCC, 2006; Pearson, Walker & Brown, 2005). Cette procédure permet de réduire les biais liés à l'hétérogénéité spatiale et d'assurer la représentativité statistique des données collectées.

2.3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Autour de chaque barycentre, dix parcelles d'échantillonnage sont réparties aléatoirement sur une superficie de 1 km^2 (100 ha), conformément aux approches de stratification spatiale recommandées par Brown (2002), FAO (2006) et IPCC (2006, 2019) pour les inventaires de sols et de biomasse. Chaque parcelle couvre 1000 m^2 (0,1 ha) et est subdivisée en quatre sous-parcelles de 100 m^2 chacune, une configuration fréquemment utilisée dans les dispositifs d'échantillonnage clusterisés décrits par Pearson *et al.* (2005) et Gibbs *et al.* (2007).

La distance séparant le centre du point d'observation de trois autres sous-parcelles est fixée à 12,2 mètres, conformément aux recommandations du USDA Forest Inventory and Analysis Program (Bechtold & Patterson, 2005) pour maintenir une dispersion suffisante tout en limitant la variabilité microspatiale. Les sous-parcelles 3 et 4 sont orientées respectivement à 120° et 240° par rapport à la pente dominante, suivant la disposition angulaire utilisée dans les dispositifs circulaires ou triangulaires afin de réduire les biais liés à la topographie (Anderson & Ingram, 1993; Hairiah *et al.*, 2001).

2.4 COLLECTE DES ÉCHANTILLONS DE SOLS

Les échantillons de sols sont prélevés au centre de chaque sous-parcelle à des intervalles de profondeur de 0–20 cm (topsoil) et 20–50 cm (subsoil), conformément aux procédures couramment recommandées par Anderson & Ingram (1993) et Nelson & Sommers (1996) pour les études de fertilité des sols et du carbone organique.

Les quatre échantillons de topsoil issus des quatre sous-parcelles de même profondeur sont réunis dans un seau et homogénéisés pour obtenir un échantillon composite, une méthode largement utilisée dans les travaux de Shepherd & Walsh (2002) et Vagen et al. (2010) pour réduire la variabilité spatiale. Le même procédé de mélange est appliqué aux échantillons de subsoil. Après homogénéisation, un sous-échantillon représentatif de ≥ 700 g est prélevé pour chaque profondeur et conservé dans un sachet en plastique. Les sachets sont étiquetés avec le code du site, du cluster, du point d'observation, la profondeur et la date de collecte, conformément aux recommandations de Huntington et al. (2015) pour la traçabilité des échantillons. Les informations sont inscrites lisiblement au marqueur permanent à l'extérieur du sachet.

L'échantillon de masse cumulée (bulk sample) est prélevé au centre de la parcelle. Les échantillons sont collectés à différentes profondeurs: 0–20 cm, 20–50 cm, 50–80 cm et 80–110 cm, en veillant à recueillir l'intégralité du sol extrait à chaque intervalle, comme suggéré par Ellert & Bettany (1995) et Batjes (1996) pour l'analyse du stock de carbone des sols. Une plaque d'échantillonnage est utilisée pour réceptionner tout le sol extrait par la tarière et pour empêcher l'effondrement du trou, comme décrit dans les protocoles d'échantillonnage FAO (2006). La plaque est solidement appuyée au sol afin d'être parfaitement plane avec la surface. La tarière est ensuite positionnée au centre de l'ouverture pratiquée dans la plaque. Les échantillons collectés à chaque niveau de profondeur sont placés dans des seaux distincts, avant d'être transférés dans des sachets en plastique clairement étiquetés, conformément aux pratiques recommandées par Walkley & Black (1934), Jobbágy & Jackson (2000) et les directives du IPCC (2006, 2019) pour les inventaires de carbone du sol.

2.5 TEXTURE DU SOL

Pour déterminer la texture du sol, nous avons appliqué la méthode tactile décrite dans les guides de Thien (1979), popularisée par le USDA Soil Survey Staff (1993, 2017) et largement reprise dans les manuels de la FAO (2006). Un échantillon représentant environ un quart de la paume de la main est prélevé et débarrassé des matériaux grossiers supérieurs à 2 mm (graviers et particules non désirées). Une faible quantité d'eau est progressivement ajoutée afin d'humidifier le sol. L'échantillon est ensuite malaxé jusqu'à obtenir une pâte homogène, suffisamment humide, sans excès d'eau et sans présence d'agrégats. La pâte est roulée entre le pouce et l'index pour former d'abord une petite boule, puis façonnée en un cylindre en la faisant glisser de la paume vers les doigts et inversement. Cette manipulation permet d'évaluer la cohésion, la plasticité et la consistance du sol, critères essentiels pour classer la texture selon les catégories établies par Thien (1979) et le USDA (texture sableuse, limoneuse, argileuse ou intermédiaire).

2.6 MÉTHODES D'ANALYSES DES ÉCHANTILLONS DE SOLS

Un total de 2560 échantillons de sol a été collecté, séché à l'air libre puis tamisé à 2 mm afin d'éliminer les particules grossières, conformément aux protocoles standards de préparation des sols (Gee & Or, 2002; Burt & Soil Survey Staff, 2014). Les échantillons ont ensuite été transférés au laboratoire d'analyses des sols pour être examinés à l'aide d'une approche combinant méthodes d'analyses traditionnelles et spectroscopie à réflectance diffuse dans le moyen infrarouge (MIRS), une technique reconnue pour sa rapidité et sa robustesse dans l'estimation des propriétés du sol (Janik et al., 1998; Soriano-Disla et al., 2014).

Un sous-ensemble représentatif de 256 échantillons fins (soit environ 10 % du total) a été analysé en laboratoire par méthodes conventionnelles pour déterminer les propriétés fonctionnelles clés du sol, suivant les recommandations de laboratoire internationales (Nelson & Sommers, 1996; Sparks et al., 2020).

Tous les échantillons ont ensuite été finement broyés jusqu'à obtention d'une poudre homogène, placée dans des micro-capsules, puis scannée à l'aide d'un spectromètre Bruker Tensor 27 FTIR équipé de l'accessoire de criblage haute capacité (HTS-XT). Les spectres MIR obtenus ont servi de base à la modélisation (Terhoeven-Urselmans et al., 2010; Viscarra Rossel et al., 2016).

Une régression par les moindres carrés partiels (PLS) a été utilisée pour prédire les propriétés des sols des 90 % d'échantillons restants. Dans ce modèle, les spectres MIR du sous-ensemble calibré servaient de variables indépendantes, tandis que les résultats analytiques de laboratoire associés constituaient les variables dépendantes, conformément aux approches de calibrage recommandées en spectroscopie des sols (Martens & Naes, 1989; Viscarra Rossel et al., 2006).

Cette approche analytique intégrée permet de réduire considérablement les coûts d'analyse tout en fournissant des estimations précises et comparables aux mesures de laboratoire, comme démontré dans plusieurs études d'étalonnage MIRS (Brown et al., 2006; Shepherd & Walsh, 2007).

2.7 ANALYSES STATISTIQUES

Nous avons évalué les relations entre les différentes propriétés du sol à l'aide du test de corrélation de Pearson. Les différences de concentration des propriétés du sol entre les sites sentinelles ont été examinées par une analyse de variance à un facteur (ANOVA à sens unique), avec un niveau de signification de 5 %. Pour les variables présentant des différences significatives, une analyse post hoc a été effectuée en utilisant le test de la différence honnêtement significative (HSD) de Tukey afin d'identifier les groupes distincts. Toutes les analyses statistiques et géostatistiques ont été réalisées avec le logiciel R (R Core Team, 2020).

3 RÉSULTATS

3.1 TEXTURE DES SOLS

Des différences significatives de teneur en sable, limon ou argile ont été observées entre les sites sentinelles. Les taux d'argile les plus élevés ont été observés dans les sites d'Amdjamena (78%) et Bokoro (78%) tandis que le taux le plus faible a été observé à Temki (13%). Pour la teneur en sable, les taux les plus élevés ont été observés dans les sites de Temki (73%), Djogolo (62%), et Tersef (62%) tandis que les faibles taux ont été observés à Amdjamena (14%) et Bokoro (12%) (Tableau 1).

Tableau 1. Valeurs moyennes de l'argile, du limon et du sable pour chaque site

Sites sentinelles	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)
Amdjamena	78.82	6.63	14.55
Bokoro	78.76	8.69	12.55
Chialo	36.23	19.41	44.36
Djogolo	22.76	14.32	62.92
Mangalme	36.81	17.95	45.24
Melfi	48.84	20.35	30.81
Temki	13.19	13.74	73.07
Tersef	30.41	7.02	62.57

3.2 PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DES SOLS

Les propriétés chimiques des sols prélevés présentent une variabilité notable, reflétant à la fois la diversité pédologique et les variations des conditions environnementales dans la zone d'étude (Tableau 1). Ainsi, les valeurs de pH varient de 4,94 à 10,74 avec une moyenne de $6,67 \pm 0,66$, indiquant que la majorité des sols se situe dans une gamme légèrement acide et alcaline, typique des sols sahéliens soumis à diverses pratiques de gestion et influences parentales.

Par ailleurs, les concentrations élevées d'Aluminium (Al) (jusqu'à 1320 mg kg^{-1} , moyenne $606,7 \text{ mg kg}^{-1}$) suggèrent la présence de sols potentiellement acidifiables. Cependant, la moyenne modérée indique que la majorité des échantillons se situe à des niveaux tolérables pour la plupart des cultures. En revanche, les teneurs très faibles en Bore (B) (moyenne $0,13 \text{ mg kg}^{-1}$) signalent un risque potentiel de déficit, ce micronutritriment étant essentiel pour la croissance des plantes.

En ce qui concerne le Fer (Fe) et le Manganèse (Mn), les concentrations moyennes de Fe ($125,6 \text{ mg kg}^{-1}$) et Mn ($76,3 \text{ mg kg}^{-1}$) se situent dans la gamme attendue pour des sols tropicaux. Néanmoins, les valeurs maximales élevées suggèrent que certains sites peuvent présenter une saturation en fer et manganèse, ce qui pourrait être limitant pour certaines cultures sensibles.

Quant au Phosphore (P), la moyenne est de $13,07 \text{ mg kg}^{-1}$, associée à une valeur maximale de 231 mg kg^{-1} , indique une disponibilité généralement faible à modérée, susceptible de limiter la productivité en l'absence de fertilisation. De même, les faibles concentrations en Zinc (Zn) ($0-6,88 \text{ mg kg}^{-1}$, moyenne $0,72 \text{ mg kg}^{-1}$) suggèrent un risque de carence en micronutritriment limitant dans de nombreux sols de la zone d'étude.

Concernant les macronutriments échangeables, les teneurs moyennes faibles en Magnésium ($Mg = 3,24 \text{ cmol kg}^{-1}$) et Potassium ($K = 0,40 \text{ cmol kg}^{-1}$) indiquent que ces éléments sont limitants sur certains sites, et pourraient nécessiter un amendement fertilisant. En parallèle, la moyenne des bases échangeables ($14,13 \text{ cmol kg}^{-1}$) et de l'acidité très faible ($0,03 \text{ cmol kg}^{-1}$) montrent que les sols sont faiblement acides et modérément fertiles en cations échangeables.

De plus, la faible valeur moyenne de conductivité électrique ($CE = 0,07 \text{ dS m}^{-1}$) indique que les sols sont non salins, tandis que les faibles teneurs en Azote ($N = 0,04 \%$) et en Carbone organique du sol ($COS = 5,23 \text{ g kg}^{-1}$) révèlent une pauvreté en matière organique et en azote, limitant potentiellement la fertilité naturelle et la capacité de stockage du carbone.

Tableau 2. *Valeurs statistiques des propriétés chimiques de la zone*

Propriétés chimiques	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
Ph	4.94	10.74	6.67	0.66
Al (mg kg^{-1})	1.08	1320	606.66	265.46
Bore (B) (mg kg^{-1})	0	21.15	0.13	0.62
Fer (Fe) (mg kg^{-1})	1	364	125.63	50.24
Manganèse (Mn) (mg kg^{-1})	0.43	551.55	76.28	50.63
Phosphore (P) (mg kg^{-1})	0	231	13.07	18.83
Zinc (Zn) (mg kg^{-1})	0	6.88	0.72	0.54
Magnésium (Mg) (cmol kg^{-1})	0	12.75	3.24	2.56
Potassium (K) (cmol kg^{-1})	0.01	6.55	0.4	0.39
Bases échangeables (ExBas) (cmol kg^{-1})	0.08	58.36	14.13	10.74
Conductivité électrique (CE) (dS m^{-1})	0.01	0.81	0.07	0.06
Acidité (Ac) (cmol kg^{-1})	0	5.77	0.03	0.16
L'azote (N) (%)	0.01	0.27	0.04	0.03
Carbone organique du sol (COS) (g/kg)	0.68	29.97	5.23	3.42

3.3 CARBONE ORGANIQUE DES SOLS (COS)

Un large éventail de valeurs pour le COS a été observé sur l'ensemble de la zone d'étude, avec des différences significatives entre les sites. Les valeurs oscillent entre 0.68 et 30 g/kg avec une moyenne de 5g/kg et indiquent qu'une grande partie de la zone présente de sévères limitations vis-à-vis du COS, avec des valeurs en deçà des seuils critiques de 20g/kg (Figure 2). La valeur moyenne la plus élevée a été observées dans le site de Melfi (29,97g/kg), tandis que les plus faibles moyennes ont été observées dans les sites d'Amndjamena (1.73g/kg) et Bokoro (1.52g/kg). Ces deux sites montrent des valeurs globalement plus faibles et une dispersion limitée, suggérant une faible teneur en matière organique et une homogénéité relative du sol.

La figure 2 montre que le contenu en carbone organique varie considérablement selon le site, reflétant à la fois la variabilité pédologique, les différences de végétation et les pratiques de gestion des sols dans chaque région. Ce pendant, les sites avec des valeurs élevées et dispersées (Melfi, Chialo) pourraient être prioritaires pour la conservation du carbone, tandis que les sites avec des valeurs faibles (Bokoro, Amndjamena) pourraient nécessiter des interventions pour améliorer la fertilité organique.

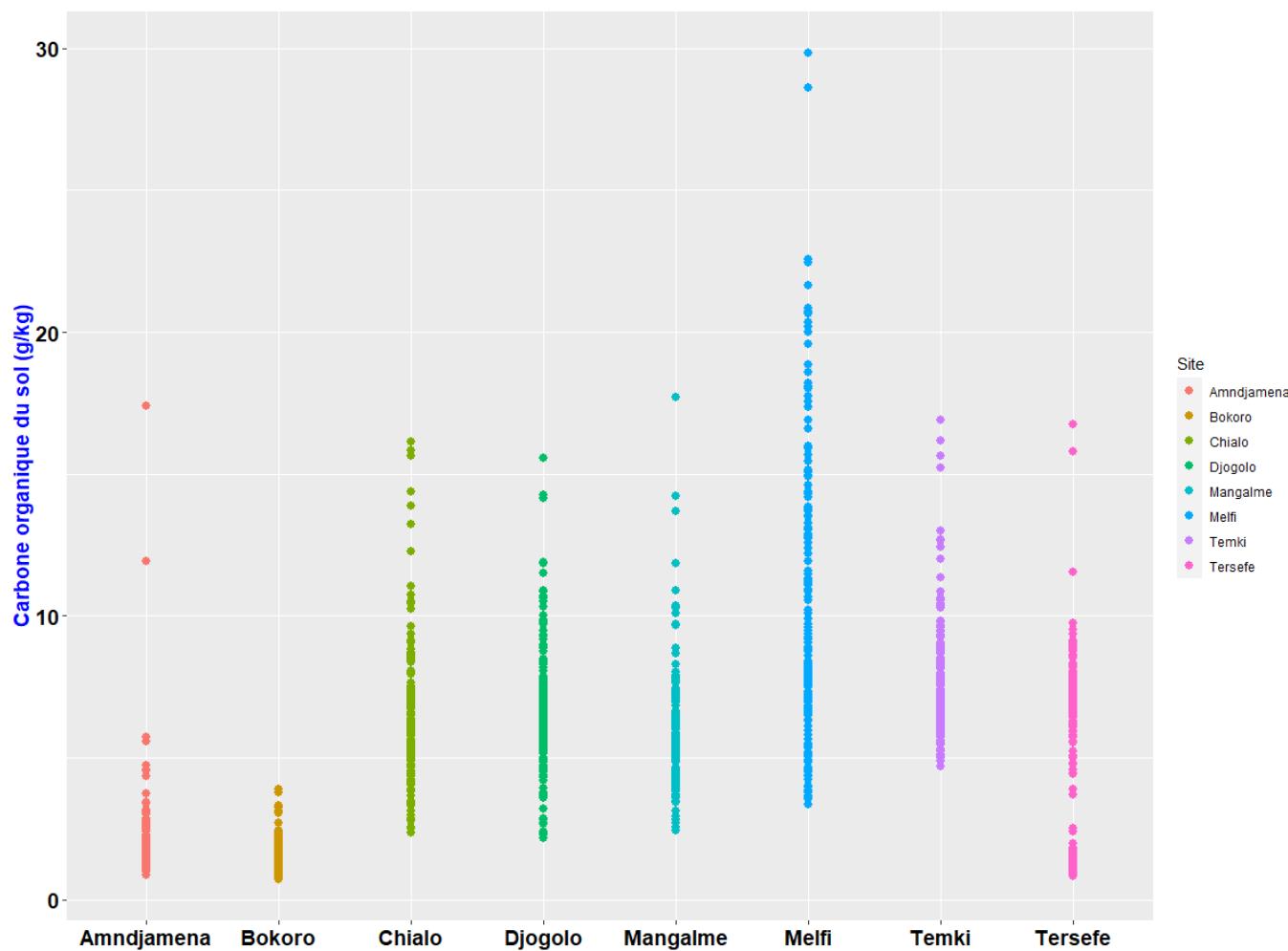


Fig. 2. Distribution du carbone organique du sol dans les sites

4 DISCUSSION

Les résultats obtenus révèlent une variabilité marquée des caractéristiques physico-chimiques des sols dans les différents sites sentinelles, reflet de l'hétérogénéité pédologique et des fortes contraintes environnementales propres aux zones sahéliennes. La distribution granulométrique met en évidence des contrastes importants, notamment avec des teneurs très élevées en argile à Amdjamena et Bokoro (78 %) et, à l'inverse, des teneurs majoritairement sableuses à Temki (73 %), Djogolo (62 %) et Tersef (62 %). Cette variabilité est typique des sols sahéliens soumis à des dynamiques d'érosion, de dépôt éolien et de variations lithologiques (Bationo *et al.*, 2012; Ibrahim *et al.*, 2015). Des études menées au Niger et au Burkina Faso ont montré des résultats similaires, avec une dominance sableuse dans les zones exposées au vent et une accumulation d'argile dans les dépressions ou zones hydromorphes (Mando *et al.*, 2005).

Les valeurs de pH, oscillant entre 4,94 et 10,74, confirment également une grande diversité pédogénétique. Ces niveaux sont comparables à ceux rapportés dans d'autres régions soudano-sahéliennes, où les sols peuvent varier de fortement acides à alcalins selon la nature du matériau parent et l'intensité de la lixiviation (Bernoux *et al.*, 2002; Sédogo, 2013). La moyenne de 6,67 suggère toutefois que la plupart des sols demeurent dans une gamme compatible avec la croissance de nombreuses cultures, comme observé par Saïdou *et al.*, 2017 dans des contextes similaires.

Les concentrations élevées d'aluminium (Al), atteignant 1320 mg kg^{-1} dans certains sites, traduisent la présence de sols potentiellement acidifiables, en accord avec les observations de Fofana *et al.*, 2019, qui ont montré que les sols tropicaux acides peuvent accumuler des formes toxiques d'aluminium échangeable. Cependant, la moyenne modérée observée ici laisse penser que la toxicité aluminique ne constitue pas un facteur limitant majeur dans la majorité des sites.

À l'inverse, les faibles teneurs en bore ($B = 0,13 \text{ mg kg}^{-1}$) confirment un risque de déficience, ce micronutritriment étant fréquemment limité dans les zones sahéliennes pauvres en matière organique (Giller *et al.*, 2009). Les concentrations en fer

(Fe) et manganèse (Mn), bien qu'inscrites dans les plages typiques des sols tropicaux (Lindsay & Norvell, 1978), montrent des valeurs maximales élevées dans certains sites, pouvant refléter des conditions hydromorphes localisées ou une réduction-oxydation fréquente, comme également rapporté par Diatta *et al.*, 2019.

En ce qui concerne le phosphore (P), la faible teneur moyenne ($13,07 \text{ mg kg}^{-1}$) corrobore les constats de nombreuses études qui identifient la déficience en P comme l'un des principaux facteurs limitants dans les sols sahéliens (Bationo & Mokwunye, 1991; Stewart *et al.*, 2020). De plus, les faibles concentrations en zinc ($\text{Zn} = 0\text{--}6,88 \text{ mg kg}^{-1}$) sont cohérentes avec les observations de Cakmak, 2008, selon lesquelles les sols sableux et pauvres en matière organique présentent régulièrement des carences marquées en micronutriments.

Les macronutriments échangeables, notamment le magnésium ($\text{Mg} = 3,24 \text{ cmol kg}^{-1}$) et le potassium ($\text{K} = 0,40 \text{ cmol kg}^{-1}$), montrent également des niveaux faibles, similaires à ceux rapportés dans les sols pauvres du Tchad et des pays voisins (Zougmoré *et al.*, 2004). Malgré cela, le complexe absorbant présente des niveaux modérés de bases échangeables ($14,13 \text{ cmol kg}^{-1}$), indiquant une réserve chimique non négligeable, comme observé également par Yao *et al.*, 2018 dans les sols ferrugineux tropicaux.

La très faible conductivité électrique ($\text{CE} = 0,07 \text{ dS m}^{-1}$) confirme l'absence de salinisation notable, un résultat cohérent avec les conditions climatiques sahéliennes caractérisées par une forte lixiviation des sels et une faible remontée capillaire, conformément aux observations de Houérou, 2001.

Les faibles niveaux d'azote total (0,04 %) et de carbone organique ($\text{COS} = 5,23 \text{ g kg}^{-1}$) révèlent une pauvreté marquée en matière organique, caractéristique majeure des sols sahéliens soumis à une faible biomasse végétale, des feux de brousse fréquents et une dégradation accélérée (Tiessen *et al.*, 1998; Lal, 2004). Ces valeurs sont largement inférieures au seuil critique de 20 g kg^{-1} recommandé pour une fertilité satisfaisante (Feller *et al.*, 1996). Les contrastes observés entre les sites, notamment les valeurs élevées à Melfi ($29,97 \text{ g kg}^{-1}$) et très faibles à Bokoro et Amdjamena, reflètent la variabilité des pratiques de gestion (jachère, pâturage, cultures intensives) et des conditions écologiques locales. Ces tendances rejoignent les observations de Batjes, 2014, qui souligne l'importance des facteurs d'usage des terres dans la distribution spatiale du carbone organique.

Enfin, les écarts importants dans les valeurs du carbone organique entre les sites indiquent la nécessité d'approches différencierées pour la gestion durable des sols. Les sites à fortes teneurs (Melfi, Chialo) présentent un potentiel intéressant pour le stockage du carbone, tandis que les sites les plus dégradés (Bokoro, Amdjamena) pourraient bénéficier d'interventions axées sur l'amélioration de la matière organique, par exemple via l'agroforesterie, l'amendement organique ou les pratiques de conservation des sols, comme soutenu par les travaux de Corbeels *et al.* (2010) et Bayala *et al.* (2022).

5 CONCLUSION

L'étude a permis de caractériser de manière détaillée les propriétés chimiques et la teneur en carbone organique des sols dans trois provinces du Tchad, couvrant des zones sahéliennes et de transition pré-soudanienne. Les résultats montrent une forte variabilité spatiale des fractions granulométriques, des éléments nutritifs et du carbone organique, soulignant l'hétérogénéité pédologique et les influences des pratiques de gestion locale.

La plupart des sols présentent un pH modéré, des concentrations tolérables en aluminium, mais des déficits notables en bore, phosphore et zinc, ainsi qu'une faible disponibilité en magnésium et potassium échangeables. Ces caractéristiques suggèrent que la fertilité naturelle des sols est limitée et que certaines zones pourraient bénéficier d'apports ciblés en éléments nutritifs pour soutenir la production agricole.

Le carbone organique du sol (COS) est globalement faible, avec des valeurs largement inférieures au seuil critique de 20 g/kg , bien que certains sites comme Melfi et Chialo présentent des stocks plus élevés, indiquant un potentiel de séquestration du carbone plus important. Cette variabilité met en évidence l'importance des pratiques de gestion durable des sols et de conservation de la matière organique, notamment dans les zones les plus dégradées comme Bokoro et Amdjamena.

En somme, les résultats de cette étude fournissent une base scientifique solide pour guider les interventions visant à améliorer la fertilité des sols et à renforcer le stockage de carbone dans les régions sahéliennes du Tchad. Ils mettent également en évidence la nécessité d'approches différencierées selon les sites, intégrant la gestion des nutriments, la conservation de la matière organique et la protection des sols pour optimiser la productivité et la durabilité des agroécosystèmes locaux.

REFERENCES

- [1] Anderson, J. M., & Ingram, J. S. (1993). Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods.
- [2] Bationo, A., & Mokwunye, A. U. (1991). Role of manures and crop residue in alleviating soil fertility constraints to crop production: With special reference to the Sahelian and Sudanian zones of West Africa. *Fertilizer Research*, 29 (1), 117–125.
- [3] Bationo, A., Waswa, B., Okeyo, J. M., Maina, F., & Kihara, J. (2012). Fighting poverty in sub-Saharan Africa: The multiple roles of legumes in integrated soil fertility management. Springer.
- [4] Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47, 151–163.
- [5] Batjes, N. H. (2014). Total carbon stocks in the various soil types of the world. *Soil Horizons*, 55, 1–12.
- [6] Bayala, J., Sanou, J., Teklehaimanot, Z., Kalinganire, A., & Ouedraogo, S. J. (2022). Contribution of agroforestry practices to soil fertility and carbon sequestration in the Sahel. *Agroforestry Systems*, 96, 113–128.
- [7] Bechtold, J. S., & Patterson, T. (2005). Relationships between soil texture and organic carbon content. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 110–119.
- [8] Bernoux, M., Arrouays, D., Cerri, C., Volkoff, B., & Jolivet, C. (2002). Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 743–749.
- [9] Brown, S. (2002). Measuring carbon in forests: Current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116, 363–372.
- [10] Brown, S., Pearson, T., & Birdsey, R. (2006). Sourcebook for land-use, land-use change and forestry projects. Winrock International.
- [11] Burt, R., & Soil Survey Staff. (2014). Soil Survey Laboratory Methods Manual (Soil Survey Investigations Report No. 42). USDA.
- [12] Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, 302, 1–17.
- [13] Corbeels, M., Shiferaw, A., & Haile, M. (2010). Soil organic matter dynamics under conservation agriculture in sub-Saharan Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 87, 369–381.
- [14] Diatta, A. A., Sène, M., & Diatta, M. (2019). Soil fertility constraints in Sahelian agroecosystems. *African Journal of Agricultural Research*, 14 (12), 778–789.
- [15] Ellert, B. H., & Bettany, J. R. (1995). Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75, 529–538.
- [16] FAO. (2006). Guidelines for soil description (4th ed.). FAO.
- [17] FAO. (2015). World reference base for soil resources 2014, update 2015. FAO.
- [18] Feller, C., Albrecht, A., & Tessier, D. (1996). Aggregation and carbon storage in tropical soils. *European Journal of Soil Science*, 47, 343–355.
- [19] Fofana, B., Jama, B., & Bayala, J. (2019). Tree-based systems and soil fertility improvement in sub-Saharan Africa. *Agroforestry Systems*, 93, 623–636.
- [20] Gee, G. W., & Or, D. (2002). Particle-size analysis. In *Methods of soil analysis* (pp. 255–293). SSSA.
- [21] Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks. *Environmental Research Letters*, 2 (4), 1–11.
- [22] Giller, K. E., Rowe, E. C., de Ridder, N., & van Keulen, H. (2009). Resource use dynamics and interactions in the tropics: Implications for sustainable agriculture. *Agricultural Systems*, 101, 15–27.
- [23] Hairiah, K., Sitompul, S. M., Noordwijk, M., & Palm, C. (2001). Methods for sampling carbon stocks above and below ground. ICRAF Technical Manual.
- [24] Houérou, H. N. (2001). Biogeography of the arid steppes of Africa. *Journal of Arid Environments*, 48, 19–41.
- [25] Huntington, T. G., Richardson, A. D., & McGuire, K. J. (2015). Climate and forest ecosystem carbon cycling. *Forest Ecology and Management*, 355, 24–36.
- [26] Ibrahim, A., Adamou, A., & Hassane, A. (2015). Soil fertility decline and management options in West African drylands. *African Journal of Environmental Science*, 9, 88–97.
- [27] IPCC. (2006). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC.
- [28] IPCC. (2019). Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC.
- [29] Janik, L. J., Merry, R., & Skjemstad, J. O. (1998). Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions? *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38, 681–696.
- [30] Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon. *Ecological Applications*, 10, 423–436.
- [31] Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304, 1623–1627.
- [32] Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421–428.

- [33] Mando, A., Stroosnijder, L., & Brussaard, L. (2005). Effects of termites on infiltration and soil fertility in the Sahelian zone. *Applied Soil Ecology*, 28, 165–175.
- [34] Martens, H., & Naes, T. (1989). *Multivariate calibration*. Wiley.
- [35] Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. In *Methods of soil analysis* (pp. 961–1010). SSSA.
- [36] Pearson, T., Brown, S., & Birdsey, R. (2005). Measurement guidelines for the sequestration of forest carbon. U.S. DOE.
- [37] Pearson, T., Walker, S., & Brown, S. (2005). *Sourcebook for LULUCF projects*. Winrock International.
- [38] R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.
- [39] Saïdou, A., Brussaard, L., & Richards, P. (2017). Soil fertility and management in West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 109, 5–20.
- [40] Sédogo, M. (2013). Soil fertility issues in the Sudanian zone of West Africa. *West African Journal of Applied Ecology*, 23, 37–50.
- [41] Shepherd, K. D., & Walsh, M. G. (2002). Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 988–998.
- [42] Shepherd, K. D., & Walsh, M. G. (2007). Infrared spectroscopy for rapid soil assessment. In *Advances in Agronomy* (Vol. 97, pp. 247–291). Academic Press.
- [43] Soriano-Disla, J. M., Janik, L. J., & Viscarra Rossel, R. A. (2014). Proximal soil sensing for soil carbon measurement. *Soil Research*, 52, 708–722.
- [44] Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., & Soltanpour, P. N. (2020). *Methods of soil analysis*. SSSA.
- [45] Stewart, C. E., Plante, A. F., Paustian, K., Conant, R. T., & Six, J. (2020). Soil carbon saturation concepts. *Global Change Biology*, 26 (5), 2212–2226.
- [46] Terhoeven-Urselmans, T., Vagen, T. G., Spaargaren, O., & Shepherd, K. D. (2010). Prediction of soil fertility properties from a global soil mid-infrared spectral library. *Soil Science Society of America Journal*, 74, 1792–1799.
- [47] Thien, S. J. (1979). A flow diagram for teaching texture analysis of soils. *Journal of Agronomic Education*, 8, 54–55.
- [48] Tiessen, H., Cuevas, E., & Chacon, P. (1998). Nutrient limitations in savanna soils. *Biogeochemistry*, 42, 69–84.
- [49] USDA Soil Survey Staff. (1993). *Soil Survey Manual*. USDA.
- [50] USDA Soil Survey Staff. (2017). *Soil Survey Manual (updated edition)*. USDA.
- [51] Vagen, T. G., Shepherd, K. D., Walsh, M. G., & Winowiecki, L. (2010). Remote sensing and soil spectral libraries for soil carbon assessment. *Geoderma*, 158, 32–41.
- [52] 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. *Geoderma*, 131, 59–75.
- [53] Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter. *Soil Science*, 37, 29–38.
- [54] Yao, M. K., Angui, P. K. T., & Teasse, F. (2018). Soil organic carbon distribution and determinants in West African drylands. *Catena*, 165, 460–470.
- [55] Zougmoré, R., Mando, A., & Stroosnijder, L. (2004). Effect of soil and water conservation on soil fertility. *Soil Use and Management*, 20, 125–131.