



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Evaluation du carbone organique des sols de la province de l'Estuaire (NW, Gabon) selon le type d'occupation

I.E. MBAGOU MWE-ZUE ONA^{1,2*}, NDZENBORO ENDAMANE^{1,3},
R. WALLA OBIANG³ et F. EBA²

¹Ecole Doctorale des Grandes Ecoles, Libreville, Gabon.

²Ecole Normale Supérieure, laboratoire pluridisciplinaire des sciences, Libreville, Gabon.

³Institut de la Recherche Agronomique et forestière, laboratoire de pédologie, Libreville, Gabon.

*Auteur correspondant; E-mail: mbagou2@yahoo.fr.

Received: 03-04-2023

Accepted: 13-06-2023

Published: 30-06-2023

RESUME

Le sol est la meilleure alternative aux gaz à effet de serre car, selon le GIEC, il constitue le plus important réservoir superficiel à carbone avec plus de 1500 à 2000 Gigatonnes de carbone captés par année. Pendant longtemps, l'évaluation du potentiel de stockage en carbone organique dans les sols du Gabon a été exclusivement orientée dans le milieu forestier. Cette étude vise à évaluer le potentiel en carbone organique des sols dans la province de l'Estuaire, selon 7 types d'occupations des sols, définies par l'Agence Gabonaise d'Etudes et Observations Spatiales (AGEOS). Nous avons comparé les sols sous terres cultivées (TC ; n=11), sous bâtis (BT ; n=12), sous cultures villageoises (CV ; n=8), sous savanes et végétations basses (SVB ; n=6), sous forêts inondées (FI ; n=9), sous forêts secondaires (FS ; n=12), à ceux sous forêts matures (FM ; n=14). Les sols ont été prélevés (n=864) sur une profondeur de 0 à 100 cm avec un pas régulier de 20 cm. Les résultats d'analyses ont montré des spécificités géographiques et géologiques dans les sols des sites échantillonnés. En effet, tous les sols sont acides (pH<5,01), et les sites proches du littoral (BT, SVB, FI et CV) sont fortement désaturés et remaniés, subissant une forte pluviométrie annuelle (3500 mm à 3000 mm), avec des densités apparentes les plus importantes, mais les teneurs en carbone organique totale (COT) les plus faibles. Tandis que les sites plus éloignés du littoral (FM, FS et TC) reposent sur un socle cristallin, subissent une pluviométrie moins importante (2500 mm à 3000 mm), possèdent des densités apparentes les plus faibles et les teneurs en COT les plus importantes. De plus, la texture argilo-limoneuse à argileuse des sols des sites FM, FS, et TC permet un stockage plus important en COT que la texture sableuse à sablo-limoneuse des sols des sites BT, SVB, FI et CV.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés: Sol, Carbone organique, pH, Densité apparente.

Evaluation of the organic carbon of the soils of the province of Estuaire (NW, Gabon) according to the type of occupation

ABSTRACT

Soil is the best alternative to greenhouse gases because, according to the IPCC, it is the largest superficial carbon reservoir with more than 1500 to 2000 Gigatons of carbon captured per year (IPCC). For a long time, the evaluation of the organic carbon storage potential in the soils of Gabon was exclusively oriented in the forest

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

9406-IJBCS

DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i4.36>

environment. This study aims to assess the organic carbon potential of soils in the Estuary province, according to 7 types of land use, defined by the Gabonese Agency for Spatial Studies and Observations (AGEOS). We compared the soils under cultivated land (TC; n=11), under buildings (BT; n=12), under village crops (CV; n=8), under savannas and low vegetation (SVB; n=6), under flooded forests (FI; n=9), under secondary forests (FS; n=12), to those under mature forests (FM; n=14). The soils were sampled (n=864) over a depth of 0 to 100 cm with a regular step of 20 cm. The analysis results showed geographical and geological specificities in the soils of the sampled sites. Indeed, all the soils are acidic (pH<5.01), and the sites near the coast (BT, SVB, FI and CV) are highly desaturated and reworked, undergoing high annual rainfall (3500 mm to 3000 mm), with the highest apparent densities, but the lowest total organic carbon (TOC) contents. While the sites farther from the coast (FM, FS and TC) rest on a crystalline basement, experience less rainfall (2500 mm to 3000 mm), have the lowest apparent densities and the highest TOC contents. In addition, the clayey-loamy to clayey texture of the soils of the FM, FS, and TC sites allows greater TOC storage than the sandy to sandy-loamy texture of the soils of the BT, SVB, FI and CV sites.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Soil, Organic carbon, pH, Apparent density.

INTRODUCTION

Au cours du 21^{ème} siècle, les changements climatiques constituent incontestablement un réel problème planétaire. L'effet de serre est l'énergie infrarouge émise du soleil, rayonnée par la surface du globe (continents et océans) et réémise dans la haute atmosphère, puis absorbés par certains gaz (CO₂, N₂O, O₃, etc) et converti en chaleur avant d'être renvoyée sur terre (Sadourny, 1994). Selon le GIEC (2001), le sol est la meilleure alternative aux gaz à effets de serres car il constitue le plus important réservoir superficiel à carbone avec plus de 1500 à 2000 Gigatonnes de carbone captés par année.

Le sol est une formation superficielle meuble de l'écorce terrestre, résultant de la transformation au contact de l'atmosphère et des êtres vivants, de la roche mère sous-jacente, sous l'influence des processus physiques, chimiques et biologiques. L'occupation du sol est la description physique de l'espace, c'est-à-dire ce qui recouvre le sol (Di Gregorio et al., 1997). Les travaux de Okanga-Guay et al., 2018 classent l'occupation des sols en quatre types biophysiques principaux : les zones de végétation (Forêt, savanes), les sols nus, les zones bâties, les surfaces humides et les plans d'eau. L'étude du comportement du sol en rapport avec son mode d'occupation implique une bonne connaissance de ses propriétés physicochimiques.

Au Gabon, plus précisément dans la province de l'Estuaire, les travaux scientifiques effectués par les pédologues de l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer), il y a plus de 40 ans (Aubert G, 1954 ; Chatelin P, 1959 ; Chatelin P, 1960 ; Chatelin P, 1964 ; Hourq et Hausknecht, 1964 ; Chatelin P, 1966 ; Delhumeau et al., 1969 ; Muller P, 1970), et plus récemment, ceux des chercheurs tels que Wade et al., 2019, Mabicka et al., 2021 traitent presque exclusivement du carbone organique des sols en milieu de forêts et de savanes. C'est pourquoi ce travail a été réalisé dans la majorité des types d'occupation des sols, répertoriées en 2020 par l'Agence Gabonaise d'Etudes et d'Observations Spatiales (AGEOS), à savoir : forêts matures, forêts secondaires, forêts inondées, terres cultivées, bâtis (milieux urbaines et péri urbains), savanes et végétations basses. L'objectif principal était de voir si les différents types d'occupation des sols présents dans la province de l'Estuaire ont un impact sur les teneurs en carbone organique, et de rechercher les causes.

MATERIEL ET METHODES

Zone d'étude

La province de l'Estuaire a une superficie de 20740 km², correspondant à 7,7% de la surface totale du Gabon. Sa population, estimée à 842 641 habitants est la plus importante du pays, ce qui correspond à

12880,5 hab/km², et représente 46,52% de la population totale du Gabon (Direction Générale de la statistique, 2015). La province de l'Estuaire est bordée au Nord par la Guinée Équatoriale, à l'Est par le Woleu-Ntem, au Sud par le Moyen-Ogooué et l'Ogooué Maritime, et à l'Ouest par l'Océan Atlantique. Les sites de prélèvements ont été réalisés dans les communes suivantes de la province de l'Estuaire (Figure 1) :

- ✚ Libreville (bâti ou milieu urbain, forêt inondée)
- ✚ Owendo (bâti ou milieu urbain, forêt inondée, savane et végétation basse)
- ✚ Akanda (bâti ou milieu urbain, forêt inondée)
- ✚ Ntoum (forêt secondaire, culture villageoise)
- ✚ Kango (forêt mature, forêt secondaire, terre cultivée, culture villageoise)
- ✚ Ekouk (forêt mature, forêt secondaire)
- ✚ Remboué (forêt mature, forêt secondaire)

Nous avons fait une différence entre terre cultivée et culture villageoise. Les terres cultivées sont de type agroforestier (exemple : culture des hévéas à Siat Kango) et les cultures villageoises correspondent à une agriculture de subsistance pratiquées par les populations.

Le climat

Bien que situé à proximité de la ligne de l'Equateur, l'Estuaire du Gabon est soumis à un climat équatorial de transition austral, caractérisé par une alternance de deux saisons : la saison des pluies et la saison sèche (Thiéblemont et al., 2009).

- La saison des pluies longue de huit mois (octobre à mai) présente un minimum vers le mois de janvier tandis que les maximas se situent en novembre et avril.

- La saison sèche qui dure quatre mois (juin à septembre) est généralement très marquée, avec au moins trois mois écologiquement secs.

Les moyennes pluviométriques sont de 2689 mm à Libreville et de 2566 mm à Kango. Les températures varient peu en cours d'année et la moyenne se situe autour de 26° C. L'humidité atmosphérique est élevée tout au

long de l'année et atteint généralement la saturation au cours de la nuit (Thiéblemont et al., 2009).

La végétation

La végétation est surtout forestière et dense : forêt ombrophile sempervirente, souvent secondaire du fait de très fortes exploitations vivrières et forestières (Okoumé et Ozigo), notamment dans la partie centrale et la zone sud. Elle devient franchement dégradée le long de l'axe routier et dans l'angle Sud-Ouest (forêt sous jachère). Les forêts primaires se situent plus à l'Est, vers les Monts de Cristal.

La géologie

La province de l'Estuaire est constituée au nord-est par le socle cristallin qui affleure dans les Monts de Cristal et dans la région de Medouneu. On y trouve des roches qui appartiennent au complexe de base cristallophyllien, d'une part (granites, gneiss, ectinites, quartzo-diorites, etc) et au système de la Noya au sud-ouest, d'autre part qui comprend deux séries séparées par une discordance probable : une série inférieure schisto-calcaire et une série supérieure schisto-gréseuse.

Les formations géologiques qui composent les terrains sédimentaires sont de types crétacés et tertiaires, et ont donné des sols ferrallitiques fortement désaturés (Thiéblemont et al., 2009).

Matériels

Le matériel de l'étude était constitué de sols prélevés dans plusieurs sites sur les axes Libreville-Owendo-Akanda-Ntoum-Meyan-Cocobeach-Kango-Remboué. Plusieurs types de sols de textures variées ont été examinés afin d'apprécier le potentiel en COT des sols de la province de l'Estuaire.

Le matériel technique utilisé était composé de :

- Un véhicule 4x4 pour parcourir les différents sites
- un GPS pour relever les coordonnées géographiques des sites
- une tarière manuelle pour prélever les échantillons de sols

- une pelle et une pioche pour creuser les fosses
- des sacs de congélation pour le transport des échantillons de sols
- des cylindres en fer de 5 cm de diamètre pour prélever les sols afin de déterminer leurs densités apparentes
- une colonne de tamis pour déterminer les différentes granulométries
- un pilon et un mortier pour casser les agrégats de sols
- une verrerie pour la préparation des solutions à analyser
- un appareil à pH mètre
- un four pour sécher les échantillons

Méthodes

Echantillonnage

Les prélèvements ont été effectués à la tarière manuelle, tous les 20 cm jusqu'à 100 cm de profondeur sur 72 sites, classés selon le type d'occupation des sols : forêt mature (n= 14), forêt secondaire (n=12), forêt inondée (n=9), culture villageoise (n=8), terre cultivée (n=11), savane et végétation basse (n=6), bâti (n=12). Par la suite, 72 fosses carrées de 1,5 x 1,2 m ont été creusées à l'aide d'une pioche et d'une pelle. Les prélèvements aux cylindres en fer ont été réalisés tous les 20cm de profondeur jusqu'à 100cm dans chaque fosse.

Les prélèvements des horizons superficiels (0-20cm) ont été répétés deux fois dans un périmètre restreint afin d'appréhender la variabilité locale. De ce fait, près de 432 échantillons ont été prélevés à la tarière manuelle, et 432 autres échantillons ont été prélevés par la méthode au cylindre en fer afin de déterminer les densités apparentes, selon la norme AFNOR NF X31-105. Au final, ce sont près de 864 échantillons de sols qui ont été prélevés et isolés dans des sacs réfrigérants, et apporter au laboratoire. Par la suite, le poids humide avant séchage a été mesuré. Les échantillons ont été séchés au four à une température de 25°C pendant 10 jours.

La séparation des éléments grossiers de la terre fine a été réalisée à l'aide d'une colonne de tamis à maille ronde de 2 mm. Les échantillons de terre fine ont été pesés, puis

conditionnés pour des analyses physico-chimiques.

Mesure des caractéristiques physiques du sol

La densité apparente (Da)

La densité apparente a été déterminée par la méthode normalisée AFNOR NF X31-105, et le calcul s'est faite selon la relation :

$$Da = \frac{Ms}{V} (g/cm^3)$$

Da = Densité apparente (g/cm³), Ms = Masse de l'échantillon sec (g), V= Volume du cylindre (cm³), Avec $V = \pi \cdot r^2 \cdot h$ et r = rayon de la sonde (cm) ; h = hauteur (cm)

La teneur en eau

La teneur en eau a été calculée par l'intermédiaire de la formule suivante (Baran, 2005 ; Mermoud, 2006) :

$$\% E = \left(\frac{mf - ms}{ms} \right) \times 100$$

Avec mf : masse de l'échantillon frais, ms : masse de l'échantillon sec

Mesure des caractéristiques chimiques du sol

Le carbone organique total (COT)

Le carbone organique total a été mesuré suivant la méthode Walkley et Black (1934), et calculé d'après la formule :

$$COT (\%) = \frac{(Volume\ de\ bichromate\ de\ potassium\ 1N) \times (0,004)}{Poids\ du\ sol\ (g)} \times 100$$

En considérant que 1 ml de bichromate de potassium 1N = 4 mg de carbone.

$$COT (\%) = \frac{(V_{Cr2O7}) \times (0,004)}{Poids\ du\ sol\ (g)} \times 100$$

$$COT (gC/kg) = \frac{(V_{Cr2O7}) \times (0,004)}{Poids\ du\ sol\ (kg)}$$

VCr₂O₇ : Volume du bichromate de potassium
En considérant que 1 ml de bichromate de potassium 1N = 4 mg de carbone.

Les teneurs en matière organique (M.O) étaient calculées selon la formule :

$$M.O (\%) = COT (\%) \times 1,724$$

Les stocks de carbone organique des sols (SCOS) ont été calculés à partir de la formule suivante (Venkatapen, 2012) :

$$SCOS (kg/m^2) = COT * Da * e$$

Avec C : teneur en carbone organique ($g \cdot kg^{-1}$ sol) ; Da : Densité apparente ($g \cdot cm^{-3}$) ; e : épaisseur de l'horizon de sol exprimée en cm.

Étalonnage et mesures du pH.

L'appareil utilisé est un pH-mètre 7110 avec une résolution de 0,01. L'étalonnage du pH-mètre s'est fait à l'aide d'une solution tampon à pH 9 pour une température de 25°C. La méthode instrumentale de mesure du pH est réalisée à l'aide d'une électrode en verre dans une suspension de sol dilué à 1/5 (fraction volumique) dans de l'eau déminéralisé.

Analyses statistiques

Le tableur Microsoft Excel 2007 ® a été utilisé pour la saisie et le traitement des données. Le logiciel XLSTAT 2021.1.1 a servi à l'analyse en composantes principales (ACP) pour mesurer la typologie entre les différentes variables (Teneur en carbone organique, pH, Da, profondeur, etc). Les valeurs moyennes ont été ensuite comparées entre elles à l'aide des boxplots (ou boîtes à moustaches) et des analyses de variance (ANOVA) ont été réalisées pour évaluer l'influence des variables qualitatives sur la teneur en carbone organique.

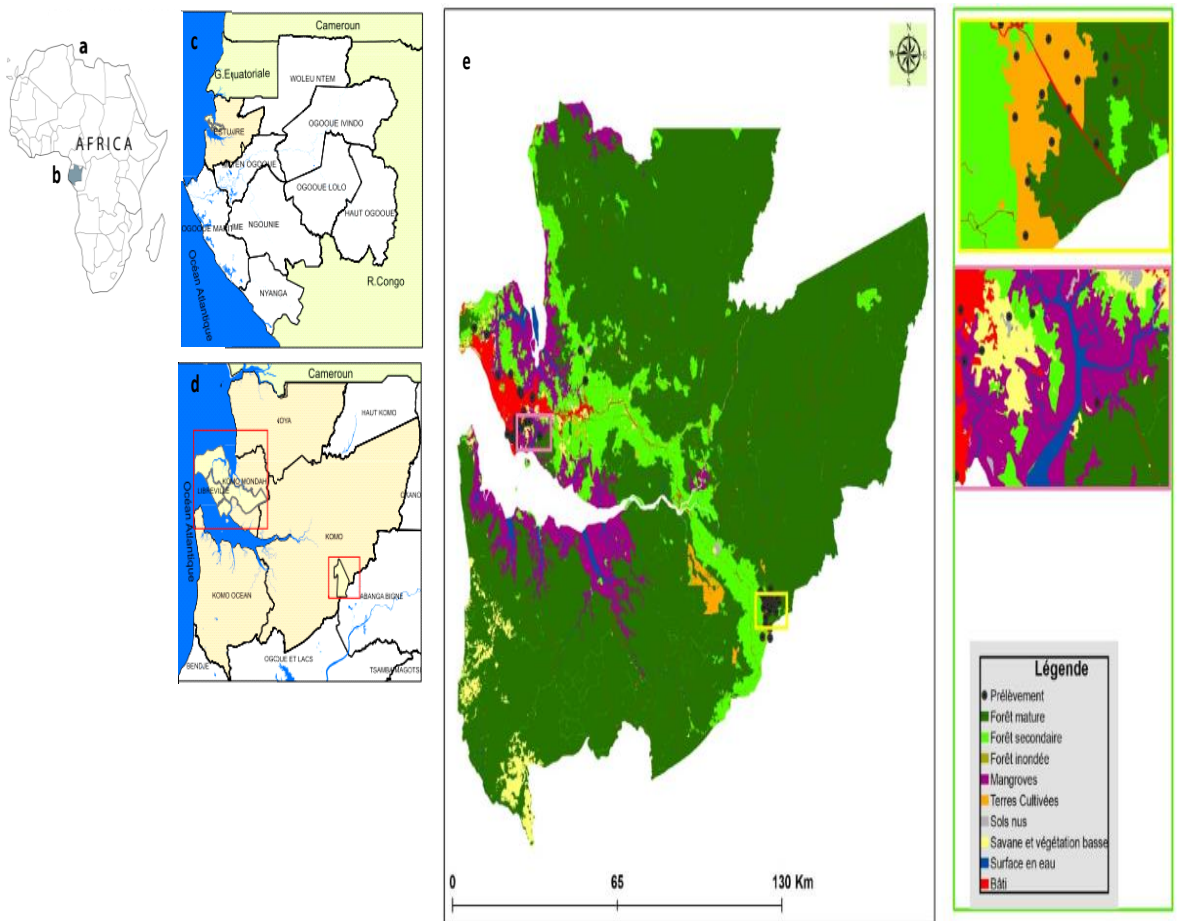


Figure 1: Localisations des sites d'échantillonnages sur la carte de l'occupation des sols de la province de l'Estuaire. Source: AGEOS, (2020).

RESULTATS

Les différents travaux réalisés par les chercheurs de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), il y a plus de 40 ans (Aubert G, 1954 ; Chatelin P, 1959 ; Chatelin P, 1960 ; Chatelin P, 1964 ; Hourq et Hausknecht, 1964 ; Chatelin P, 1966 ; Delhumeau et al., 1969 ; Muller P, 1970), et le projet SYSMIN (Thieblemont et al., 2009) ont montré que les sols du domaine côtier atlantique de la province de l'Estuaire sont d'âge Permien-éocène (textures de type sableux, sablo-limoneux, limono-argileux, argileuses à argilo-marneuses).

Les valeurs des différentes caractéristiques physico-chimiques des sols, selon leur type d'occupation, sont reportées dans le Tableau 1 sur les profils allant de 0 à 100 cm de profondeur. Il apparait une forte variabilité de ces différents paramètres entre les sites échantillonnés.

Caractéristiques physiques des sols

Les variations des caractéristiques physiques, notamment, la densité apparente (Da), la teneur en eau en fonction de la profondeur et le mode d'occupation des sols sont consignées dans le tableau 1.

Les densités apparentes (Da) augmentent du profil de surface (0-20 cm) au profil le plus profond (80-100 cm), quel que soit le mode d'occupation des sols (Tableau 1). Par ailleurs, les Da diminuent en fonction de l'occupation des sols. Ainsi, les sols des bâtis (BT), les sols des savanes et végétations basses (SVB), les sols des cultures villageoises (CV) et forêts inondées (FI) ont des Da plus grandes que les sols des forêts matures (FM), forêts secondaires (FS) et les terres cultivés (TC).

Les teneurs en eau des sols pour tous les modes d'occupations augmentent du profil de surface (0-20 cm) au profil le plus profond (80 - 100 cm) (Tableau 1). En outre, les sols des forêts matures (FM), les sols de forêts secondaires (FS) et les sols de terres cultivées (TC) ont des teneurs en eau plus élevées que les autres sols (BT, SVB, FI, CV).

Caractéristiques chimiques des sols

Les données sur les caractéristiques chimiques des sols déterminés dans ce travail sont : la teneur en carbone organique totale (COT) et le pH. Celles déduites notamment : matière organique du sol (MOS), et le stock de carbone organique du sol (SCOS) sont consignées dans le Tableau 1.

Les sols de forêt mature (FM) ont des teneurs en carbone organique totale (COT) diminuant de 22,21 gC/kg de l'horizon de surface (0-20 cm) à 14,5 gC/kg à l'horizon le plus profond (80-100 cm), soit une perte de 7,71 gC/kg. Les sols des forêts secondaires (FS) ont des teneurs en COT qui diminuent fortement de 16,5 gC/kg de l'horizon de surface (0-20 cm) à 6,0 gC/kg à l'horizon le plus profond (80-100 cm), soit une perte de 10,5 gC/kg. Les sols des terres cultivées (TC) ont des teneurs en COT qui diminuent fortement de 23,30 gC/kg de l'horizon de surface (0-20 cm) à 1,80 gC/kg à l'horizon le plus profond (80-100 cm), soit une perte de 21,5 gC/kg.

Les sols des bâtis (BT), des savanes et végétations basses (SVB), forêts inondées (FI) et cultures villageoises (CV) ont des teneurs en carbone organique totale (COT) diminuant respectivement de 11,71 gC/kg, 12,69 gC/kg, 10,17 gC/kg et 12,60 gC/kg de l'horizon de surface (0-20 cm) à 6,62 gC/kg, 6,91gC/kg, 2,23 gC/kg et 1,30gC/kg à l'horizon le plus profond (80-100 cm), soit des pertes de 5,09 gC/kg, 5,78 gC/kg, 7,94 gC/kg, et 11,3 gC/kg.

Les données (Tableau 1) montrent que les sols des forêts matures (FM), forêts secondaires (FS) et terres cultivées (TC) concentrent, sur l'horizon de surface (0-20cm), les teneurs en COT les plus importantes (1,5 à 2 fois plus) que les autres sols (BT, SVB, FI, CV).

Analyses Statistiques

Analyses en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composante principale (Figure 2) montre que les variables MOS, SCOS, et COT, sont positivement corrélées entre elles et à la teneur en eau, mais négativement corrélées à la densité apparente (Da), au pH, et à la profondeur (Depth).

La Figure 3 montre une bipolarisation de la distribution des individus. En effet, dans le cadran positif, les individus des sites FM, FS, TC et CV sont tous présents, à l'exception seulement de CV1. Tandis que le cadran négatif regroupe majoritairement les individus des sites BT, FI et SVB, à l'exception de quelques individus tels que BT5, FI5, SVB5, et SVB4 qui se retrouvent dans le cadran positif.

La Figure 4 montre une forte variabilité du carbone organique en fonction de la profondeur.

La Figure 5 indique qu'il existe une variabilité des teneurs en carbone organique entre tous les sites échantillonnés (forêts matures ou FM, terres cultivées ou TC, forêts inondées ou FI, cultures villageoises ou CV, forêts secondaires ou FS, savanes et végétations basses ou SVB, et bâtis ou BT).

Tableau 1: Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques des sites échantillonnés ; Da : Densité apparente ; pH ; COT : Carbone Organique Total ; SCOS : Stock de Carbone Organique du Sol ; MOS : Matières Organique du Sol.

Occupation du sol	Profondeur (cm)	pH	MOS (%)	COT (gC/kg)	SCOS (MgC/Ha)	Da (g/cm ³)	Teneur en eau (%)
BT 1	0-20	4,27	20,2	11,71	25,46	1,09	22,45
		(0,10)	(0,92)	(0,54)	(1,88)	(0,14)	(3,68)
BT 2	20-40	4,27	18,9	10,94	28,12	1,29	27,66
		(0,16)	(2,12)	(1,22)	(2,40)	(0,04)	(3,70)
BT 3	40-60	4,5	15,9	9,21	24,73	1,34	22,45
		(0,07)	(0,21)	(0,11)	(0,09)	(0,02)	(2,69)
BT 4	60-80	4,6	15,6	9,06	24,86	1,37	18,64
		(0,11)	(2,97)	(1,73)	(4,41)	(0,03)	(10,39)
BT 5	80-100	4,76	11,4	6,62	18,63	1,41	33,33
		(0,17)	(3,02)	(1,86)	(4,52)	(0,13)	(10,47)
SVB 1	0-20	3,9	21,9	12,69	27,4	1,08	8,7
		(0,28)	(3,75)	(2,15)	(3,52)	(0,06)	(0,01)
SVB 2	20-40	4,3	16,6	9,65	22,42	1,16	8,7
		(0,27)	(0,49)	(0,31)	(0,07)	(0,04)	(3,19)
SVB 3	40-60	4,68	15,9	9,21	22,32	1,21	13,21
		(0,08)	(4,24)	(2,44)	(5,66)	(0,02)	(9,94)
SVB 4	60-80	4,8	9,9	5,76	14,31	1,24	27,27
		(0,16)	(1,41)	(0,81)	(2,45)	(0,04)	(0,28)
SVB 5	80-100	5,02	11,9	6,91	17,78	1,29	27,66
		(0,21)	(1,53)	(0,92)	(2,58)	(0,08)	(0,35)
FS 1	0-20	4,47	28,4	16,5	26,42	0,8	30,25
		(0,02)	(7,50)	(4,38)	(4,64)	(0,13)	(2,04)
FS 2	20-40	4,44	17,8	10,3	19,86	0,99	33,13
		(0,02)	(3,46)	(1,98)	(2,86)	(0,04)	(0,47)
FS 3	40-60	4,47	12,9	7,5	15,81	1,05	33,79
		(0,01)	(1,41)	(0,85)	(1,05)	(0,06)	(2,01)
FS 4	60-80	4,47	10,9	6,3	14,33	1,13	36,63
		(0,03)	(0,42)	(0,21)	(0,40)	(0,01)	(0,91)
FS 5	80-100	4,51	10,3	6	13,76	1,13	37,92
		(0,05)	(0,39)	(0,19)	(0,38)	(0,02)	(0,97)
CV 1	0-20	4,6	21,7	12,6	28,73	1,14	25,48

		(0,14)	(5,59)	(3,25)	(6,63)	(0,05)	(1,83)
CV 2	20-40	4,8	13,8	8	19,36	1,21	28,07
		(0,07)	(5,59)	(3,25)	(7,73)	(0,02)	(0,95)
CV 3	40-60	4,9	5,9	3,4	8,43	1,24	29,41
		(0,28)	(1,63)	(0,92)	(2,04)	(0,06)	(0,08)
CV 4	60-80	5,3	3,6	2,1	5,54	1,32	29,53
		(0,14)	(0,99)	(0,57)	(1,41)	(0,03)	(0,34)
CV 5	80-100	5,5	2,2	1,3	3,54	1,36	30,01
		(0,15)	(0,93)	(0,54)	(1,39)	(0,04)	(0,35)
FI 1	0-20	4,33	17,5	10,17	22,11	1,08	6,38
		(0,03)	(3,46)	(2,03)	(2,36)	(0,08)	(1,92)
FI 2	20-40	4,37	12,6	7,3	18,77	1,19	9,09
		(0,16)	(0,78)	(0,43)	(0,57)	(0,04)	(2,91)
FI 3	40-60	4,6	11,5	6,69	17,97	1,24	13,21
		(0,07)	(2,76)	(1,63)	(4,19)	(0,02)	(1,53)
FI 4	60-80	4,7	7,6	4,39	12,04	1,27	15,38
		(0,11)	(2,69)	(1,53)	(4,07)	(0,03)	(6,80)
FI 5	80-100	4,86	3,8	2,23	6,28	1,31	25
		(0,13)	(2,55)	(1,19)	(4,11)	(0,04)	(7,02)
TC 1	0-20	4,43	40,2	23,3	41,01	0,88	35,08
		(0,05)	(8,77)	(5,09)	(8,05)	(0,03)	(1,52)
TC 2	20-40	4,36	27,8	16,1	29,62	0,92	37,23
		(0,04)	(7,92)	(4,60)	(7,10)	(0,07)	(0,83)
TC 3	40-60	4,41	16,6	9,6	19,58	1,02	38,41
		(0,01)	(6,72)	(3,89)	(7,70)	(0,03)	(2,28)
TC 4	60-80	4,4	7,1	4,1	8,69	1,06	41,63
		(0,01)	(2,83)	(1,63)	(3,39)	(0,01)	(1,12)
TC 5	80-100	4,38	3,1	1,8	3,89	1,08	43,22
		(0,01)	(2,21)	(1,45)	(3,04)	(0,01)	(1,17)
FM 1	0-20	4,41	38,1	22,1	37,57	0,85	38,08
		(0,04)	(3,04)	(1,77)	(1,07)	(0,05)	(2,78)
FM 2	20-40	4,36	33,8	19,6	36,06	0,92	42,01
		(0,03)	(3,05)	(1,77)	(2,28)	(0,03)	(2,54)
FM 3	40-60	4,4	29,5	17,1	32,83	0,96	45,6
		(0,01)	(2,19)	(1,27)	(2,01)	(0,01)	(1,84)
FM 4	60-80	4,4	26,4	15,3	29,99	0,98	48,2
		(0,09)	(0,99)	(0,57)	(0,91)	(0,01)	(0,36)
FM 5	80-100	4,27	25	14,5	28,71	0,99	48,71
		(0,06)	(0,96)	(0,54)	(0,88)	(0,01)	(0,38)

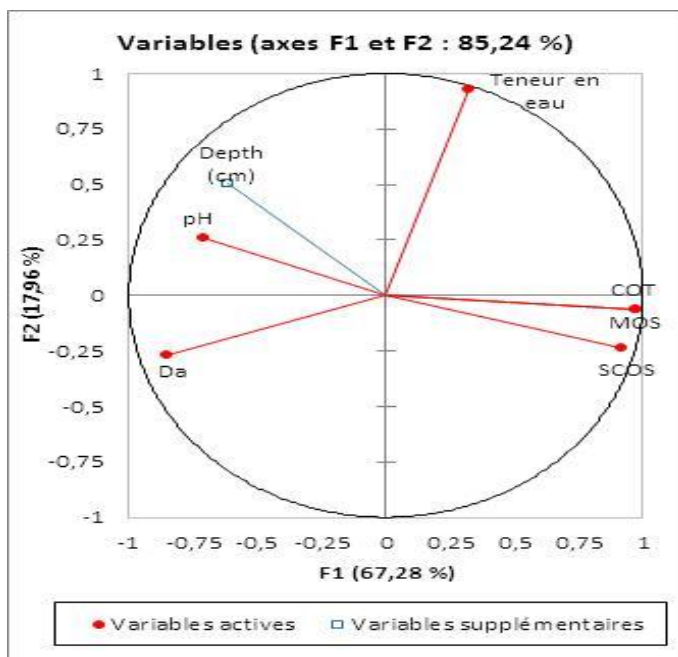


Figure 2: Analyse des composantes principales des variables physico-chimiques des différents types d'occupation des sols de la province de l'Estuaire au Gabon.

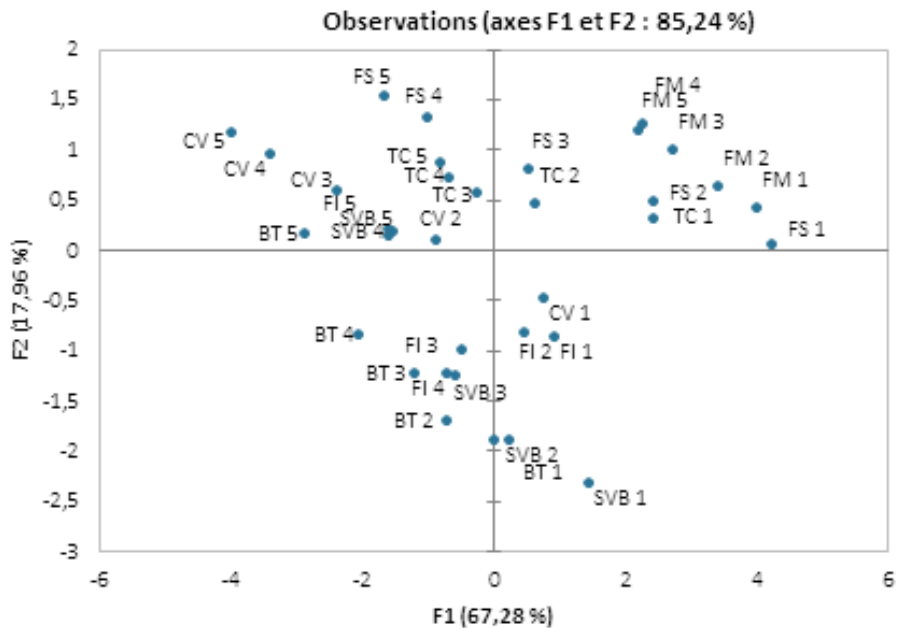


Figure 3: Graphe de la distribution des individus (profondeurs) sur l'ensemble des types d'occupation des sols.

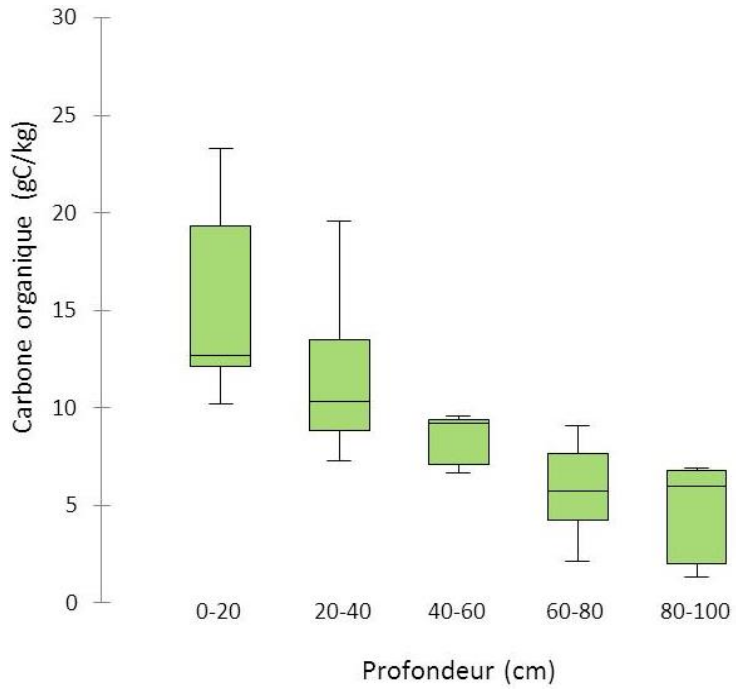


Figure 4: Boîtes à moustaches du carbone organique en fonction de la profondeur.

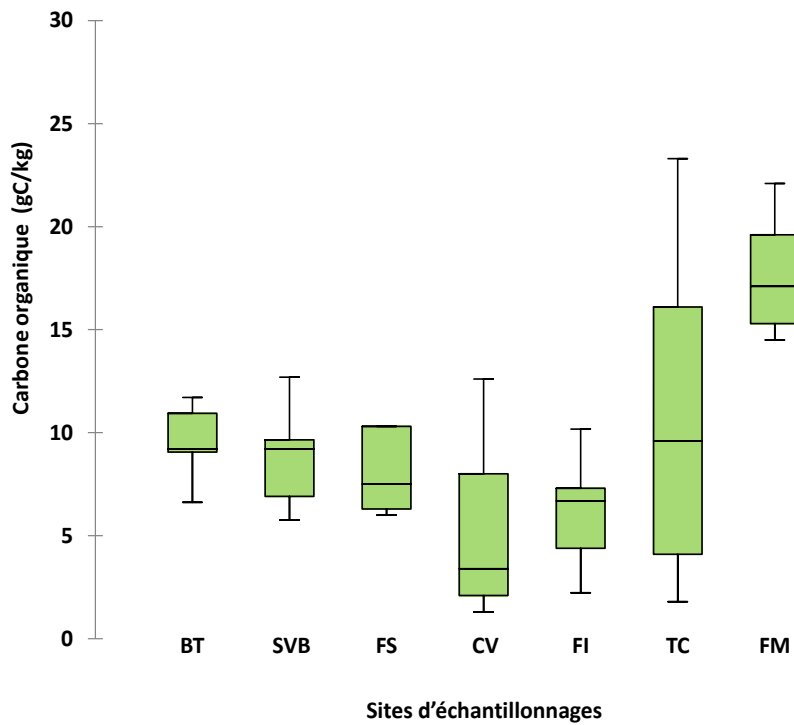


Figure 5: Boîtes à moustaches du carbone organique en fonction des sites.

DISCUSSION

Les résultats de pH obtenu sur tous les types de sols entre 0 et 100 cm montrent que l'ensemble des sites échantillonnés sont acides. Les valeurs moyennes de pH des sols des forêts matures (\bar{X} = 4,37), les forêts secondaires (\bar{X} = 4,47) et des sols des terres cultivées (\bar{X} = 4,40) ont une acidité légèrement plus élevée que celles des sols des cultures villageoises (\bar{X} = 5,02), les sols des bâtis (\bar{X} = 4,48), les sols des forêts inondées (\bar{X} = 4,57), les sols des savanes et végétations basses (\bar{X} = 4,54). Nos résultats sont en accord avec les travaux de l'ORSTOM (Aubert G, 1954 ; Chatelin P, 1959; Chatelin P, 1960; Chatelin P, 1964; Hourq et Hausknecht, 1964; Chatelin P, 1966 ; Delhumeau et al., 1969 ; Muller P, 1970 ; Martin D, 1981) réalisés sur les sols gabonais, notamment ceux de la province de l'Estuaire, dans les années 60, et ceux de King et al. (1997), Delègue et al. (2001), Wade et al. (2019), et Mabicka et al. (2021) qui ont aussi observé un caractère très acide (pH < 5,1) des sols au Gabon.

Nous pouvons dire que la variation des valeurs de pH dans ces différentes occupations du sol peut s'expliquer par des facteurs abiotiques et anthropiques. En effet, Wanatebe et al. (2015) signalent par exemple que dans les sols forestiers, l'acidification du sol est associée à une augmentation de l'acidité échangeable et à une diminution des pourcentages de saturation en bases. La forte densité des arbres dans les milieux forestiers et terres cultivées (agroforestiers) entraîne un important dépôt de litières végétales, contrairement aux sols des bâtis et les sols de cultures villageoises où le labour intensif du sol a détruit les agrégats (Wei et al., 2014) et favorise le lessivage des nutriments (Young, 1989 ; Nair, Buresh, Mugendi et al., 1999 ; Sharma et al., 2009). De ce fait, les zones de bâtis et les cultures villageoises ont des pH légèrement supérieurs à ceux des milieux forestiers et terres cultivées (Tellen et Yerima Bernard, 2018 ; Tejnecký et al., 2020 ; Terefe et Kim, 2020) à cause des fortes activités sur brûlis qui ont été réalisés après déforestation afin d'aménager les zones sollicitées. Ce type d'activité, dans les régions tropicales,

augmente le pH après le brûlage (Thomaz et al., 2014 ; Filho et al., 2015; Ngo-Mbogba et al., 2015; Tejnecký et al., 2020). Nous pouvons donc constater que le type d'occupation du sol a un impact sur le pH des sols.

Les sols sous forêts matures (\bar{X} = 0,94 g.cm⁻³) et les sols des terres cultivées (\bar{X} = 0,99 g.cm⁻³) ont des valeurs moyennes de densités apparente qui se rapprochent, mais sont plus faibles que celles des sols sous forêts secondaires (\bar{X} = 1,02 g.cm⁻³), les sols sous savanes et végétations basses (\bar{X} = 1,19 g.cm⁻³), les sols des forêts inondées (\bar{X} = 1,21 g.cm⁻³), les sols sous cultures villageoises (\bar{X} = 1,25 g.cm⁻³), et les sols des bâtis (\bar{X} = 1,3 g.cm⁻³). Toutes ces variations des densités apparentes sur les sols étudiés montrent bien l'impact des différents types d'occupation des sols (Feller et Beare, 1997). Les sols de forêts matures sont des sols originels, n'ayant pas subi les impacts des activités humaines. Ils vont donc conserver leur biomasse (aérienne et souterraine), et la forte densité des arbres apportera beaucoup de matières organiques au sol par la litière, ce qui contribuera à une faible compaction des sols (Takoutsing et al., 2015). Dans le cas des sols sous bâtis et sous cultures villageoises, la quasi-totalité de la végétation naturelle est retirée, laissant ainsi le sol exposé aux éléments. De plus, au cours d'intenses activités de terrassement et de labour, le sol est fortement compacté, augmentant ainsi sa densité (Hajabbasi et al., 1997). Nos résultats sont en accord avec les travaux de l'ORSTOM (Aubert G, 1954 ; Chatelin P, 1959 ; Chatelin P, 1960 ; Chatelin P, 1964 ; Hourq et Hausknecht, 1964 ; Chatelin P, 1966 ; Delhumeau et al., 1969 ; Muller P, 1970), réalisées dans la province de l'Estuaire dans les années 60, et les travaux de Wade et al. (2019) et Mabicka et al. (2021).

Nous constatons aussi une bipolarisation des densités apparentes liées aux sites de prélèvements, c'est-à-dire que les sites proches du littoral côtier, aussi appelés « Grand Libreville » (Libreville, Akanda, Owendo, Ntoun) ont les densités apparentes légèrement plus élevées que les sites plus éloignés du littoral (Kango, Ekouk, Remboué). Cette

particularité peut est reliée à la texture des sols (Feller et Beare, 1997). En effet, les différents travaux réalisés par les chercheurs de l'ORSTOM (Aubert G, 1954 ; Chatelin P, 1959 ; Chatelin P, 1960 ; Chatelin P, 1964 ; Hourq et Hausknecht, 1964 ; Chatelin P, 1966 ; Delhumeau et al., 1969 ; Muller P, 1970) et les travaux du projet SYSMIN réalisés par Thieblemont et al., 2009 ont montré que les sols proches du littoral côtier (BT, SVB, FI, et CV) sont majoritairement de type sableux à sablo-limoneux. Tandis que les sols plus éloignés du littoral côtier (FM, TC, FS) sont majoritairement de type argileux, argilo-limoneux à argilo-marneux. Plus un sol est riche en particules grossières, plus sa densité apparente est importante, alors que plus un sol est riche en particules fines, plus sa densité apparente est faible (Jones, 1973 ; Lepsch et al., 1994 ; Feller et Beare, 1997).

Nous avons aussi constatés que démographiquement, les sites du « Grand Libreville » ont la densité de population la plus importante de la province de l'Estuaire, estimée à 842.641 habitants, soit 12880,5 hab/km², ce qui représente 46,52 % de la population totale du Gabon. De ce fait la forte anthropisation des sols du « Grand Libreville » explique les valeurs importantes des densités apparentes de ces mêmes sols. Nous pouvons remarquer que le type d'usage des sols et la densité d'une population ont un fort impact sur la densité apparente des sols.

Sur le long des profils des sols de 0 à 1 m de profondeur, les valeurs moyennes des teneurs en carbone organique total sont plus importantes dans les sols sous : forêts matures (\bar{X} = 17,72 gC/kg), terres cultivées (\bar{X} = 10,98 gC/kg), et forêts secondaires (\bar{X} = 9,50 gC/kg). Les autres sols ont des teneurs en COT plus faible (BT : \bar{X} = 9,32 gC/kg ; SVB : \bar{X} = 8,84 gC/kg ; CV : \bar{X} = 5,48 g/kg et FI : \bar{X} = 6,15 g/kg). Nous pouvons constater que la différence des teneurs en COT entre ces deux groupes d'occupation des sols est lié à la forte minéralisation de la matière organique causée par les sollicitations intenses subi par le sol (terrassement, labour, etc), lesquelles mélangent les horizons et détruit les agrégats qui protègent la matière organique (Wei et al.,

2014). Ces observations sont en accord avec les travaux de Guo et Gifford (2002) qui ont montré une baisse importante des teneurs en carbone organique lors de la conversion de forêts en terres cultivées.

De toutes les observations précédentes, il en ressort une spécificité géologique et géographique : les échantillons de sols prélevés sur les sites du bassin intérieur, plus éloignés du littoral (Kango, Ekouk, Remboué) ont des teneurs en COT plus importantes, et leurs pH sont plus acides que les échantillons de sols prélevés sur les sites du bassin atlantique, plus proches du littoral (Libreville, Owendo Akanda, Ntoum). La Figure 3 confirme clairement ces observations dans la mesure où il apparait une bipolarisation de la distribution des individus. En effet, dans le cadran positif, les individus des sites du bassin intérieur (FM, FS, TC et CV) sont tous présents, à l'exception seulement de CV1. Tandis que le cadran négatif regroupe majoritairement les individus des sites du bassin atlantique (BT, FI et SVB), à l'exception de quelques individus tels que BT5, FI5, SVB5, et SVB4 qui se retrouvent dans le cadran positif. D'après les travaux antérieurs de Delhumeau et al. (1969), les sites du bassin intérieur sont constitués majoritairement de formations de type argilo-limoneux à argileux, tandis que les sites du bassin atlantique ont des formations de type sableux à sablo-limoneux.

Nous pouvons constater que le couvert végétal et la texture du sol sont des facteurs qui contribuent largement à l'amélioration des teneurs en COT des sols. En effet, les sols avec des textures de types argileux à argilo-limoneux préservent mieux le COT que les sols à textures de types sableux à sablo-limoneux (Jones, 1973 ; Lepsch et al., 1994 ; Feller et Beare, 1997). De plus, le temps de résidence du carbone dans les micro-agrégats (< 50 µm) est supérieur à celui dans les macroagregats (> 50 µm) (Golchin et al., 1994 ; Besnard et al., 1996 ; Six et al., 1998 ; Six et al., 2002 ; Chevallier et al., 2004). La différence de structure entre les micros et les macro-agrégats n'est toutefois peut-être pas le seul facteur à l'origine d'une différence de vitesse de minéralisation des matières organiques (MO) car : (i) ces MO peuvent être de différentes natures dans ces

deux entités, et (ii) les durées de vie des macros et micro-agrégats, régulant la durée de piégeage des MO, ne sont pas les mêmes (Six et al., 2002). Néanmoins, les agrégats, et surtout les micro-agrégats, sont utilisés comme fractions indicatrices du degré de protection physique du carbone.

Conclusion

La connaissance du potentiel en COT des sols de la province de l'Estuaire nécessite de mener des études complémentaires dans le but de montrer l'influence des facteurs biotiques et abiotiques sur la dégradation de la matière organique d'une part, et l'importance de la vitesse de renouvellement de la fraction minérale d'autre part.

CONFLITS D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

La rédaction principale a été assurée par IEMM, et FE. L'enquête de terrain et les analyses statistiques ont été menées par IEMM, NE, et RWO.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les populations qui nous ont données accès à leurs terrains pour échantillonnage, l'entreprise Siat Gabon pour l'accès à ses sites d'exploitations des hévéas, le bureau d'étude géotechnique (Géoguide) et le laboratoire de Pédologie de l'Institut de la Recherche Agronomique et Forestière (IRAF) pour leurs appuis techniques et scientifiques dans la réalisation de cette étude.

REFERENCES

AGEOS. 2020. Surveillance Satellitaire des Forêts Gabonaises. Rapport Final, p. 24.

Aubert Georges. 1954. *Observations sur les Sols de Certaines Régions du Gabon*. ORSTOM: Paris 1954; p. 20.

Baran N. 2005. Suivie de la teneur en eau des sols dans les bassins du Gardon d'Andruze et Touch. Rapport Final. BRGM/RP-53654-FR, p. 41.

Besnard E, Chenu C, Balesdent J, Arrouays D. 1996. Fate of Particulate Organic Matter in Soil Aggregates during Cultivation. *European Journal of Soil Science*, **47**: 495-503. DOI:

<https://doi/abs/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01849.x>

Chatelin V. 1959. *Reconnaissance Pédologique le long de la route Kougouleu-Medouneu*. ORSTOM: Inst. Et. Centrafricain; p. 15.

Chatelin V. 1960. *Influence du Couvert Végétal et du passé culturel sur les sols ferrallitiques du Gabon*. Pédol. ORSTOM; p. 4.

Chatelin V. 1964. *Les Sols du Bassin Sédimentaire Côtier entre Libreville-Lambaréné*. Pédol. ORSTOM; p. 61.

Chatelin V. 1966. *Essai de Classification des Sols Ferrallitiques du Gabon*. Sér. Pédol. ORSTOM.

Chevallier T, Blanchart E, Albrecht A, Feller C. 2004. The Physical Protection of Soil Organic Carbon in Aggregates: a Mechanism of Carbon Storage in a Vertisol under Pasture and Market Gardening (Martinique, West Indies). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **103**: 375-387. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880903004468>

Delègue MA, Fuhr M, Schwartz D, Mariotti A, Nasi R. 2001. Recent Origin of a Large Part of the Forest Cover in the Gabon Coastal Area based on Stable Carbon Isotope Data. *Oecologia*, **129**: 106-113. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004420100696>.

Delhumeau M. 1969. Carte pédologique de reconnaissance à 1/200.000. Notice explicative sur la feuille Libreville-Kango. ORSTOM: Mission du Gabon; p. 69.

Di Gregorio A, Jansen J M. 1997. A new Concept for a Land Cover Classification System in Proceedings of the Earth Observation and Environmental Information 1997 Conference. Alexandria, Egypt; 13-16.

Direction Générale de la Statistique. 2015. Résultats globaux du Recensement Général de la Population et des Logements de 2013 du Gabon (RGPL 2013), p. 61.

Feller C, Beare MH. 1997. Physical Control of Soil Organic Matter Dynamics in the Tropics. *Geoderma*, **79**: 69-116. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706197000396>

- Filho A, Ribeiro, Adams C, Manfredini S, Aguilar R, Neves W A. 2015. Dynamics of Soil Chemical Properties in Shifting Cultivation Systems in the Tropics: a Meta-Analysis. *Soil Use and Management*, **31**(4): 474-482. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12224>.
- GIEC. 2001. Lignes Directrices 2001 du GIEC pour les Inventaires Nationaux de gaz à effet de serre, préparé par le Programme pour les Inventaires Nationaux de Gaz à effet de Serre.
- Golchin A, Oades JM, Skjemstad JO, Clarke P. 1994. Soil Structure and Carbon Cycling. *Australian Journal of Soil Research*, **32**: 1043-1068. URL: <https://www.publish.csiro.au/SR/SR9941043>
- Guo LB, Gifford RM. 2002. Soil Carbon Stocks and Land Use Change: a Meta-Analysis. *Global Change Biology*, **8**: 345-360. DOI: <https://doi/abs/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
- Hajabbasi MA, Jalalian A, Karimzadeh HR. 1997. Deforestation Effects on Soil Physical and Chemical Properties, Lordegan, Iran. *Plant Soil*, **190**: 301-308. DOI: <https://doi/abs/10.1023/A:1004243702208>
- Hourcq V, Hausknecht JJ. 1964. Carte Géologique de Reconnaissance à 1/500.000ème. Notice explicative de la feuille Libreville-ouest - Service des Mines Brazzaville, p. 25.
- Jones. 1973. The organic matter content of the Savanna soils of West Africa. *J. Soil Sci.*, **24**: 42-53. DOI: <https://doi/abs/10.1111/j.1365-2389.1973.tb00740.x>
- King J, Moutsinga JB, Doufoulon G. 1997. Conversion of Anthropogenic Savanna to Production Forest through Fire-Protection of the Forest-Savanna Edge in Gabon, Central Africa. *For. Ecol. Manag.*, **94**: 233-247. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03925-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03925-4).
- Lepsch IF, Menk JR, Oliveira JB. 1994. Carbon Storage and Other Properties of Soils under Agriculture and Natural Vegetation in Sao Paulo State, Brazil. *Soil Use Manage*, **10**: 34-42. DOI: <https://doi/abs/10.1111/j.1475-2743.1994.tb00455.x>
- Mabicka RG, Musadji NY, Ndongo A, Soumaho J, Mouha DL, Abaker MG, Ondo JA, Ravire E, Mbina MM. 2021. Carbon and Nitrogen Stocks under Various Land Cover in Gabon. *Geoderma Regional*, **25**: e00363. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352009421000080>
- Martin D. 1981. *Les Sols du Gabon: Pédogenèse, Répartition et Aptitudes à 1: 2 000 000*. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. ORSTOM: Bondy, France.
- Mermoud A. 2006. Etat de l'eau du sol. Cours de physique du sol, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, p. 30.
- Muller JP. 1970. *Contribution à l'étude du Phénomène d'Appauvrissement. Etude Morphologique et Typologique des sols appauvris en argile du Gabon. Nomenclature et classification*. ORSTOM: Libreville; p. 141.
- Nair K, Buresh J, Mugendi, N, Latt R. 1999. Nutrient cycling in Tropical Agroforestry systems (Myths and science). In *Agroforestry in Sustainable* Buck LE, Lassoie JP, Fernandes ECM (eds). Boca Raton: FL, USA; 1-31
- Ngo-Mbogba M, Yemefack M, Nyeck B. 2015. Assessing Soil Quality under Different Land Cover Types within Shifting Agriculture in South Cameroon. *Soil Tillage Res.*, **150**: 124-131. URL: https://www.academia.edu/download/46016262/Assessing_soil_quality_under_different_120160528-27713-onfnky.pdf
- Okanga M, Mpie C, Ndonghan N, Moussavou G, Obiang M, Biboutou S, Nkoumakali B, Mintsia R. 2018. Transformations des paysages périurbains de Libreville (Gabon) : dynamiques de l'occupation du sol par télédétection de la zone de Bambouchine-Bikélé, 1990-2014. *Revue Canadienne de Géographie/Tropical Journal of Tropical Geography*, **5**(2): 25-33. URL: <http://laurentian.ca/cjtg>
- Sadourny R. 1994. *Le Climat de la Terre*. Collection Dominos, Flammarion; p.126
- Sharma L, Raju R, Das K, Rao B, Kulkarni S, Srinivas K, Gajbhiye N. 2009. Soil Fertility and Quality Assessment under tree-, crop-, and pasturebased land-use systems in a Rain fed Environment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **40**: 1436-1461. DOI:

- <https://doi/abs/10.1080/00103620902818096>
- Six J, Elliott ET, Paustian K, Doran JW. 1998. Aggregation and Soil Organic Matter Accumulation in Cultivated And Native Grassland Soils. *Soil Science Society of America Journal*, **62**: 1367 – 1377. URL: <https://pubag.nal.usda.gov/download/17217/PDF>
- Six J, Feller C, Deneff K, Ogle SM, Sà JC, Albrecht A. 2002. Soil Organic Matter, Biota and Aggregation in Temperate and Tropical Soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, **22**: 755-775. URL: <https://hal.science/hal-00885974/file/hal-00885974.pdf>
- Takoutsing JC, Weber, ZT, Keith S. 2015. Soil Chemical Properties Dynamics as Affected by Land Use Change in the Humid Forest Zone of Cameroon. *Agroforest Syst.*, **90**: 1089-1102. DOI: 10.1007/s10457-015-9885-8.
- Tejnecký V, Křížová P, Penížek, MA, Sillam DD, Šobotník J, Akama PD, Lojka B, Němeček K, Borůvka L, Drábek O. 2020. The influence of landuse on tropical soil chemical characteristics with emphasis on aluminium. *J. Inorg. Biochem.*, **204**: 110962 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2019.110962>.
- Tellen VA, Yerima BP. 2018. Correction to: effects of land use change on soil Physicochemical Properties in selected areas in the North West region of Cameroon. *Environ. Syst. Res.*, **7**(1): 1-29. DOI: <https://10.1186/s40068-018-0106-0>
- Terefe B, Kim DG. 2020. Shifting Cultivation maintains but its Conversion to Monocropping Decreases Soil Carbon and Nitrogen Stocks Compared to Natural Forest in Western Ethiopia. *Plant Soil*, **434**(1-2): 4–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-019-03942-0>.
- Thieblemont D, Castaing C, Billa M, Bouton P, Preat A. 2009. Notice Explicative de la Carte Géologique et des Ressources minérales de la République Gabonaise à 1/1 000 000. Editions DGMG - Ministère des Mines, du Pétrole, des Hydrocarbures, Libreville, p. 384.
- Thomaz EL, Antoneli V, Doerr SH. 2014. Effects of fire on The Physicochemical Properties of Soil in a Slash-And-Burn Agriculture. *Catena*, **122**: 209–215. URL: <https://www.researchgate.net/profile/Edivaldo-Thomaz/publication/264198521>
- Venkatapen C. 2012. Étude des déterminants géographiques et Spatialisation des stocks de carbone des Sols de la Martinique. Thèse de Doctorat, Université des Antilles et de la Guyane, p. 334.
- Wade A, Richter D, Medjibe P, Bacon R, Heine R, White L, Poulsen R. 2019. Estimates and Determinants of Stocks of Deep Soil Carbon in Gabon, Central Africa. *Geoderma*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.004>.
- Walkley A, Black CA. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposal modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, **37**: 29-38. URL: https://journals.lww.com/soilsci/citation/1934/01000/an_examination_of_the_degtjareff_method_for.3
- Watanabe K, Kuwae T. 2015. How organic carbon derived from multiple sources contributes to Carbon Sequestration processes in a Shallow Coastal System? *Global Change Biology*, **21**(7): 2612-2623. DOI: <https://doi/pdf/10.1111/gcb.12924>
- Wei X R, Shao M, Gale W, Li L. 2014. Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural. *Sci. Rep.*, **4**(1): 1062. <https://doi.org/10.1038/srep04062>
- Young A, International Council for Research in Agroforestry. 1989. Agroforestry for soil conservation. URL: https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/03_Agroforestry_for_soil_conservation.pdf