

IMPACTS DE L'HEVEACULTURE (*Hévéa brasiliensis*) SUR LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS DANS LA REGION DE KANGO (N-W, GABON)

I. E. MBAGOU MWE-ZUE ONA^{1,2}, NDZENGBORO ENDAMANE^{1,3}, F. EBA², D. MENDOUME MINKO²

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

E-mail : mbagou2@yahoo.fr

RESUME

Cette étude a permis de déterminer les propriétés physico-chimiques des sols, les stocks de carbone, l'indice de dégradation des sols (IDS), le potentiel de séquestration de carbone (CSP) dans la région de Kango. Nous avons comparé des sols sous culture d'hévéa d'âges différents : 10 ans ($n = 8$) et 30 ans ($n = 13$), à ceux sous forêts ($n = 5$). Les sols ont été prélevés ($n = 312$) sur une profondeur de 0 à 120 cm avec un pas régulier de 20 cm. Les résultats d'analyses montrent que les sols des sites présentent une texture argileuse. Les sols sont très acides, le pH varie entre $4,34 \pm 0,06$ et $4,72 \pm 0,08$ avec des densités apparentes qui varient en moyenne entre $0,91 \pm 0,09 \text{ g/cm}^3$ et $1,13 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$. Les stocks de carbone diminuent (forêt : $61,41 \pm 1,93 \text{ MgC/ha}$; hévéa 10 ans : $34,14 \pm 0,12 \text{ MgC/ha}$). L'IDS sous hévéas de 10 ans (-53,89 %) est plus impacté que ceux sous hévéas de 30 ans (-30,92 %). Le CSP des sols sous hévéas de 30 ans est 3 fois plus important que les sols sous hévéas de 10 ans.

Mots clés : Sol, Stock de carbone, pH, Densité apparente.

ABSTRACT

*IMPACTS OF RUBBER CULTIVATION (*HÉVÉA BRASILIENSIS*) ON THE PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF SOILS IN THE KANGO REGION (N-W, GABON)*

This study made it possible to determine the physicochemical properties of soils, carbon stocks, the soil degradation index (SDI), the carbon sequestration potential (CSP) in the Kango region. We compared soils under rubber tree cultivation of different ages: 10 years ($n = 8$) and 30 years ($n = 13$), with those under forests ($n = 5$). The soils were sampled ($n = 312$) to a depth of 0 to 120 cm with a regular step of 20 cm. The results of the analyzes show that the soils of the sites have a clay texture. The soils are very acidic, the pH varies between 4.34 ± 0.06 and 4.72 ± 0.08 with apparent densities which vary on average between $0.91 \pm 0.09 \text{ g/cm}^3$ and $1.13 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$. Carbon stocks are decreasing (forest: $61.41 \pm 1.93 \text{ MgC/ha}$; 10-year-old rubber: $34.14 \pm 0.12 \text{ MgC/ha}$). The IDS for 10-year-old rubber trees (-53.89%) is more affected than those for 30-year-old rubber trees (-30.92%). The CSP of soils under 30-year-old rubber trees is 3 times greater than soils under 10-year-old rubber trees.

Keywords : Soil, Carbon stock, pH, bulk density.

INTRODUCTION

Le sol est un milieu très sensible aux modes d'occupations dont il est l'objet. Milieu indispensable pour de nombreux être vivants et espèces végétales, le sol est soumis souvent à des affectations variées, modifiant son équilibre naturel. Le remplacement des forêts en plantations, en systèmes urbains aménagés, etc en sont quelques exemples.

L'étude du comportement du sol en rapport avec son mode d'occupation implique une bonne connaissance de ses propriétés physico-chimiques. Aussi, la détermination des caractéristiques physico-chimiques des sols est-elle requise pour comprendre leur mode de fonctionnement et aussi pour la connaissance des processus de leur évolution.

Le passage du système forestier à un système d'occupation différent du sol s'accompagne d'impact sur l'écosystème terrestre (Dawoe et al., 2014). C'est la comparaison des propriétés physico-chimiques entre le sol forestier en tant que sol originel et le sol cultivé qui définit la nature de l'évolution. Il faut y associer également la position de l'échantillon dans l'échelle des profils et l'âge du type d'occupation. En zone équatoriale, les sols des systèmes agroforestiers de cacaocultures (Dawoe et al., 2014 ; Cornwell (2014) ; Bertin Takoutsing et al., 2015), de caféiculture (Nilovna et al., 2019), d'hévéaculture (Selma et al., 2014 ; Mia Zhang et al., 2007) présentent tous des variations des propriétés physico-chimiques par rapport à la forêt, et pour les systèmes de monoculture, par rapport à l'âge de leur implantation.

Au Gabon, des milliers d'hectares de forêt ont été concédés aux sociétés agro-industrielles telles que Siat-Gabon et Olam pour leur exploitation en hévéaculture. Si au plan climatique, il est acquis, même sans étude préalable, que la déforestation entraîne a priori une augmentation de l'émission des gaz à effet de serre, il en va différemment des sols vis-à-vis desquels, l'évaluation des impacts s'appuie sur la détermination des propriétés physico-chimiques. Or cette évaluation des impacts lors

de la conversion des forêts en plantations d'exploitation de l'hévéa n'avait pas encore été réalisée au Gabon. C'est pourquoi, ce travail a été initié avec les objectifs suivants : (i) déterminer les paramètres physico-chimiques, (ii) établir des comparaisons entre les sols de forêt et ceux des parcelles de cultures de l'hévéa de 10 et 30 ans respectivement, (iii) évaluer les impacts sur les écosystèmes terrestres et (iv) chercher les corrélations entre variables physico-chimiques en rapport avec le mode d'occupation des sols.

MATERIELS ET METHODES

Dans cette étude, une approche de type « chronoséquence » a été privilégiée pour tenir compte de la dynamique spatio-temporelle des teneurs en carbone organique total dans les différentes plantations d'hévéas, tel que recommandé par les travaux de Walker et al., (2010). Par conséquent, les plantations âgées de 10 ans et 30 ans représentent des stades différents d'évolutions et de maturités des plantations en production dans cette zone. Les données obtenues seront par la suite comparées à celles des forêts secondaires qui vont représenter la végétation originelle à partir de laquelle elles ont été établies.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le Gabon est un pays d'Afrique centrale situé entre 0° 49' et 12.47" latitude Nord, et 11° 36' 35.30" longitude E avec une superficie de 267.667 km². Le Gabon a un climat tropical humide, et possède 9 provinces, dont la première est l'Estuaire (figure 1). La population du pays est estimée à 1.811.079 habitants, soit une densité de 6,7 habitants / km² (Direction Générale de la Statistique, 2015). L'étude a été réalisée dans la province de l'Estuaire, plus précisément dans la région de Kango, chef lieu du département du Komo. La ville de Kango est située entre les méridiens 10°E et 11°E, et les parallèles 0° et 1° de latitude Nord. Elle est limitée au nord par la frontière avec la Guinée Équatoriale, au sud par Lambaréné, à l'Ouest par Libreville et à l'Est par Mitzi (Nagel et al., 2009).

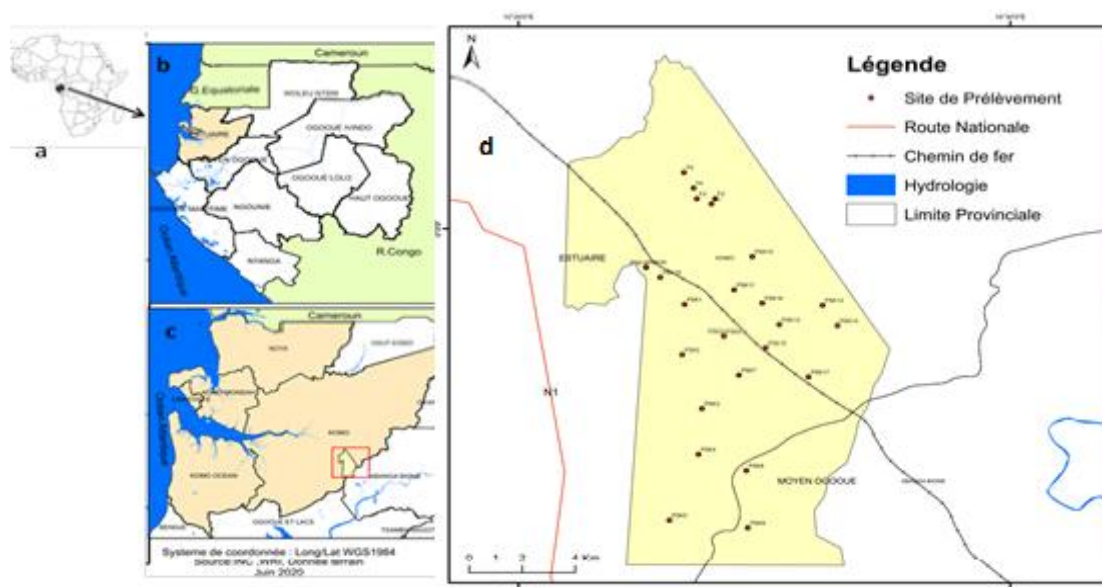


Figure 1 : Carte de localisation des sites d'échantillonnage à Siat Kango ; a : position du Gabon en Afrique ; b : position de la province de l'Estuaire au Gabon ; c : localisation du site de Siat Kango dans la province de l'Estuaire ; d : position des sites de prélèvement relativement à la surface étudiée.

Location map of sampling sites in Siat Kango; a: Gabon's position in Africa; b: position of the Estuary province in Gabon; c: location of the Siat Kango site in the Estuary province; d: position of the sampling sites relative to the surface studied.

Le climat

La région de Kango est soumise à un climat équatorial, avec deux saisons principales : une saison chaude et humide d'octobre à fin avril (interrompue par des périodes plus sèches en Janvier et Février), puis une grande saison sèche, estivale, de Mai à fin Septembre. Cette saison sèche est encadrée par deux maxima en avril et octobre-novembre (Nagel *et al.*, 2009). Le nombre de jours de pluie est compris entre 100 et 160. Les températures moyennes annuelles tournent autour de 26°C, avec des maxima et minima, respectivement, à 32°C en avril et 19°C en juillet-août, pour la ville de Kango (Nagel *et al.*, 2009). La région de Kango apparaît comme l'une des régions du Gabon où l'agressivité du climat est maximale.

La végétation

La végétation est surtout forestière et dense : forêt ombrophile sempervirente, souvent secondaire du fait de très fortes exploitations vivrières et forestières, 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. Les forêts primaires se situent plus à l'Est, vers les Monts de Cristal (Nagel *et al.*, 2009).

La géologie

Les formations géologiques constituant la région de Kango appartiennent à un socle archéen complexe récemment fracturé et soulevé (Monts de Cristal). Les sols y sont de type ferralitique (Nagel *et al.*, 2009). Le Sud-Est est occupé par des terrains d'une couverture paléo protérozoïque plissée. A l'Ouest, un bassin sédimentaire néoprotérozoïque (la Noya) est partiellement recouvert par les sédiments du bassin atlantique du Permien au Crétacé (Nagel *et al.*, 2009).

PRELEVEMENTS DES ECHANTILLONS DE SOL DANS LES PARCELLES D'ETUDES

Les prélèvements ont été effectués à la tarière, tous les 20 cm jusqu'à 120 cm de profondeur sur 26 sites, classés en 3 grands groupes : les hévéas de 30 ans (13 sites), les hévéas de 10 ans (8 sites), et les forêts secondaires (5 sites). Par la suite, 26 fosses carrées de 1,5 x 1,2 m ont été creusées au centre des interlignes des hévéas et des arbres dans les forêts. 156 échantillons ont été prélevés à la tarière, et 156 autres ont été prélevés par la méthode au cylindre afin de déterminer les densités apparentes selon la norme AFNOR NF X31-105. Ainsi, 312 échantillons de sols ont été prélevés

et isolés dans des sacs réfrigérants, puis séchés à l'air libre pendant 10 jours dans une salle dédiée au séchage à température ambiante au sein du laboratoire pédologique de l'Institut de Recherche Agronomique et Forestière (IRAF). La séparation des éléments grossiers de la terre fine a été réalisée à l'aide d'un tamis à maille ronde de 2 mm. Les échantillons de terre fine ont été pesés, puis conditionnés pour des analyses physico-chimiques.

MESURE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SOL

L'analyse granulométrique a été réalisée par la méthode à la pipette Robinson, suivant la méthode normalisée AFNOR NF X31-107 (Buol *et al.*, 2011b). La classification texturale des sols a été faite suivant le triangle de texture de

l'USDA (Buol *et al.*, 2011b). La densité apparente a été déterminée par la méthode normalisée AFNOR NF X31-105, et le calcul s'est fait selon la relation :

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

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)

MESURES DES CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU SOL

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

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

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

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

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

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

$$SCOS \text{ (Mg/ha)} = C \cdot Da \cdot e$$

Avec C : teneur en carbone organique (g.kg⁻¹ sol) ; Da : Densité apparente (g.cm⁻³) ; e : épaisseur de l'horizon de sol exprimée en cm.

Le pH eau a été déterminé suivant la norme internationale NF ISO 10390 (Staff, 1993). 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.

PARAMETRE ECOLOGIQUE

L'impact de l'hévéaculture sur la qualité des sols a été évalué en utilisant l'indice de dégradation ou de détérioration des sols (IDS). Il est perçu comme un indice de réponse des activités anthropiques (conversion d'une forêt en agrosystème) sur la qualité écologique du sol (Dawoe *et al.*, 2014). L'IDS est mis en évidence par la formule suivante :

$$IDS = \left(\frac{Ac - Af}{Af} \right) \times 100$$

Avec Ac : valeurs des propriétés de sol dans les plantations d'hévéas d'âges variés ; Af : valeurs des propriétés de sol dans la forêt.

PARAMETRE CLIMATIQUE

Le potentiel de séquestration du carbone (CSP) des sols est perçu comme la capacité des sols à piéger le carbone atmosphérique (Nilovna *et al.*, 2019). Le CSP a été calculé à partir des stocks de carbones des cultures d'âges variés, et en prenant les stocks de carbones des forêts comme quantités initiales. Le CSP est mise en évidence par la formule suivante :

$$CSP = \left(\frac{\text{Stock de carbone de la culture} - \text{Stock de carbone de la forêt}}{\text{Nombre d'année de la culture}} \right)$$

ANALYSES STATISTIQUES

Le tableur Microsoft Excel 2007® a été utilisé pour la saisie et le traitement des données. L'analyse en composantes principales (ACP) a permis d'évaluer la typologie entre les différentes

variables (stock de carbone, pH, Da, profondeur, etc). Le logiciel R version 3.4.3 a servi aux analyses de variances (ANOVA) pour évaluer l'influence des variables qualitatives site et profondeur sur le stock de carbone (tableau 1).

Tableau 1 : Analyse de variance du stock de carbone en fonction du Site et de la Profondeur.

Analysis of variance of the carbon stock according to Site and Depth.

	Degré de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur de F	P-value
Sites	2	235,609	117,805	40,8687	1,539e-05***
Profondeurs	5	121,882	24,376	8,4566	0,002315**
Résiduelle	10	28,825	2,883		

Codes pour la significativité : « *** » P < 0,001; « ** » P < 0,01; « * » P < 0,05; « . » P < 0.1

L'effet de site (F = 40,86 et P < 0,001) et l'effet de profondeur (F = 8,45 et P < 0,05) sur la teneur en carbone organique sont significatifs. Deux modèles (avec interactions et sans interactions) ont été testés et le modèle le plus parcimonieux est celui sans interaction. Il s'écrit comme suit :

$$Y_{(ijk)} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk}$$

Avec Y : taux de carbone ; μ : effet moyen général ; α : effet de la modalité i du facteur site ; β : effet de la modalité j du facteur profondeur ; ε : résidu où l'indice k est l'indice de répétition pour le couple ij

MODELISATION

Le logiciel SigmaPlot version 12.5 a été utilisé pour la réalisation des modèles mathématiques à partir des données expérimentales, notamment les profondeurs, les densités apparentes et les teneurs en carbone organique des sols. Une visualisation en 3D est faite pour apprécier le niveau de corrélation entre toutes ces données.

RESULTATS

Les valeurs des différentes caractéristiques physico-chimiques des sols de forêt, des parcelles de culture de l'hévéa de 10 et 30 ans sont reportées dans le tableau 2 sur les profils allant de 0 à 120 cm de profondeur.

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS

Les variations des caractéristiques physiques, dans ce travail : (i) la texture, (ii) la densité apparente (Da), (iii) la teneur en eau en fonction de la profondeur et du mode d'occupation des sols sont consignées dans le tableau 2.

Pour les sols de forêt, les teneurs : (i) en argiles augmentent de 44,5 % de l'horizon de surface (0-20 cm) à 61,5 % à l'horizon le plus profond (100-120 cm), (ii) des limons diminuent de 18,5 % de l'horizon de surface à 11,15 % à l'horizon le plus profond, et (iii) des sables diminuent de 37,5 % de l'horizon de surface à 26,9 % à l'horizon le plus profond.

Pour les sols plantés d'hévéas de 30 ans, (i) les teneurs en argiles augmentent de 32 % de l'horizon de surface à 48,45 % à l'horizon le plus profond, (ii) les teneurs en limons diminuent de 34,5 % de l'horizon de surface à 19,15 % à l'horizon le plus profond, et (iii) les teneurs en sables diminuent de 36 % de l'horizon de surface à 25,4 % sur l'horizon 40-60 cm, puis augmentent jusqu'à 32,4 % à l'horizon le plus profond.

Pour les sols plantés d'hévéas de 10 ans, (i) les teneurs en argile augmentent de 39,6 % de l'horizon de surface à 50 % à l'horizon le plus profond, (ii) les teneurs en limons diminuent de 21,6 % de l'horizon de surface à 15 % à l'horizon le plus profond, et (iii) les teneurs en sables diminuent de 38,8 % de l'horizon de surface à

35 % à l'horizon le plus profond.

A titre comparatif, les teneurs en argile sont plus élevées dans les sols forestiers, puis viennent respectivement les sols plantés d'hévéas de 10 ans et de 30 ans. Les taux de limons sont plus grands dans les sols plantés d'hévéas de 30 ans, suivis des sols plantés d'hévéas de 10 ans et les sols forestiers. Enfin, les teneurs en sables sont plus élevées dans les sols plantés d'hévéas de 10 ans que dans ceux des forêts et des hévéas de 30 ans.

Les impacts sont négatifs avec les taux d'argile pour les sols plantés d'hévéas de 30 ans et 10 ans, positifs avec la distribution des taux de limons dans les mêmes sols.

La texture argileuse, d'après la classification de la FAO (1968), est préservée dans tous ces sols en dépit de leurs modes d'occupations différents. Des résultats semblables ont été obtenus par Dawoe *et al.*, (2014) lors de la transformation

des forêts en plantations de cacaoyers.

Les densités apparentes (D_a) augmentent du profil de surface (0-20 cm) au profil le plus profond (100-120 cm), quelque soit le mode d'occupation des sols (Tableau 2). Par ailleurs, les D_a diminuent en fonction de l'âge de l'occupation des sols. Ainsi, les sols plantés d'hévéas de 10 ans ont des D_a plus grandes que ceux des sols plantés d'hévéas de 30 ans et des sols forestiers. Les impacts relatifs à la densité apparente sont donc très positifs.

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 (100 - 120 cm) (Tableau 2). En outre, les sols forestiers ont des teneurs en eau plus élevées que les sols plantés des hévéas de 30 ans et 10 ans. Les impacts relatifs à la teneur en eau sont d'avantages négatifs avec les sols plantés d'hévéas de 10 ans que ceux de 30 ans.

Tableau 2 : Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques des sites échantillonnés ; Da : Densité apparente ; pH : pH eau ; C-org : Carbone organique ; SCOS : Stock de Carbone Organique du Sol ; MOS : Matière organique du sol ; CEC : Capacité d'Échange Cationique.

Average values of the physico-chemical parameters of the sampled sites; Da: Apparent density; pH: pH water; C-org: Organic carbon; SCOS: Soil Organic Carbon Stock; MOS: Soil organic matter; CEC: Cationic Exchange Capacity.

Sites	Depth (cm)	pH _w	MOS (%)	C-org (%)	C-org (g/kg)	SCOS (Mg/ha)	CEC (Cmol/kg)	Da (g/cm ³)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Teneur en eau (%)
Hévéas 30 ans	0 - 20	4,47 (0,02)	2,85 (0,79)	1,65 (0,46)	16,51 (4,58)	26,42 (4,64)	10,25 (5,03)	0,80 (0,13)	32 (4,74)	32 (1,77)	36 (6,51)	30,25 (2,04)
	20 - 40	4,44 (0,02)	1,73 (0,15)	1,00 (0,08)	10,03 (0,84)	19,86 (1,05)	3,13 (0,14)	0,99 (0,06)	38,7 (1,56)	34,5 (5,59)	26,8 (4,03)	33,13 (2,01)
	40 - 60	4,47 (0,01)	1,30 (0,18)	0,75 (0,10)	7,53 (1,04)	15,81 (2,04)	2 (0,21)	1,05 (0,04)	41,2 (2,09)	33,4 (1,94)	25,4 (0,14)	33,79 (0,21)
	60 - 80	4,46 (0,04)	1,09 (0,03)	0,63 (0,02)	6,34 (0,18)	14,33 (0,31)	1,80 (0,49)	1,13 (0,01)	43,4 (1,48)	25,5 (2,55)	31,1 (1,06)	36,63 (0,91)
	80 - 100	4,51 (0,01)	1,05 (0,18)	0,60 (0,10)	6,09 (1,04)	13,76 (2,04)	1,10 (0,21)	1,13 (0,04)	45,5 (2,09)	21,9 (1,94)	32,6 (0,14)	37,92 (0,21)
	100 - 120	4,49 (0,02)	0,80 (0,74)	0,46 (0,43)	4,62 (4,31)	11,00 (5,50)	0,80 (3,56)	1,19 (0,14)	48,45 (5,76)	19,15 (6,46)	32,4 (3,95)	38,22 (3,13)
Hévéas 10 ans	0 - 20	4,41 (0,03)	1,46 (0,09)	0,84 (0,05)	8,47 (0,52)	17,11 (0,06)	12,30 (6,21)	1,01 (0,06)	39,6 (3,15)	21,6 (0,35)	38,8 (0,34)	25,48 (1,83)
	20 - 40	4,45 (0,08)	1,33 (0,03)	0,77 (0,02)	7,74 (0,16)	17,03 (0,24)	3,52 (1,43)	1,1 (0,01)	44,1 (0,64)	22,1 (3,61)	33,8 (2,97)	28,07 (0,95)
	40 - 60	4,56 (0,05)	1,30 (0,12)	0,75 (0,07)	7,52 (0,70)	16,69 (1,18)	1,50 (0,28)	1,11 (0,03)	45 (0,78)	17 (0,07)	38 (0,71)	29,41 (0,08)
	60 - 80	4,63 (0,11)	1,13 (0,19)	0,65 (0,11)	6,53 (1,07)	15,02 (2,05)	1,10 (0,14)	1,15 (0,04)	46,1 (1,63)	16,9 (0,35)	37 (1,27)	29,53 (0,34)
	80 - 100	4,78 (0,08)	0,86 (0,07)	0,50 (0,04)	5,01 (0,42)	12,12 (0,85)	0,90 (0,21)	1,21 (0,01)	48,4 (1,13)	16,4 (0,99)	35,2 (0,14)	30,01 (2,33)
	100 - 120	4,66 (0,14)	0,97 (0,23)	0,56 (0,13)	5,6 (1,33)	13,33 (2,11)	0,60 (4,52)	1,19 (0,07)	50 (3,63)	15 (2,95)	35 (1,94)	33,3 (2,56)
Forêts	0 - 20	4,43 (0,05)	3,47 (0,30)	2,01 (0,17)	20,12 (1,74)	31,39 (0,97)	8,60 (3,48)	0,78 (0,05)	44,5 (6,29)	18,35 (2,69)	37,2 (3,61)	35,08 (1,52)
	20 - 40	4,36 (0,04)	3,04 (0,31)	1,76 (0,18)	17,66 (1,77)	30,02 (1,52)	3,68 (1,13)	0,85 (0,05)	53,4 (1,84)	14,5 (0,07)	32,1 (1,91)	37,23 (0,83)
	40 - 60	4,41 (0,01)	2,61 (0,22)	1,51 (0,13)	15,15 (1,27)	27,88 (1,57)	2,08 (0,74)	0,92 (0,03)	56 (1,84)	14,6 (0,35)	29,4 (1,48)	38,41 (2,28)
	60 - 80	4,40 (0,01)	2,30 (0,10)	1,33 (0,06)	13,36 (0,61)	25,65 (0,81)	1,04 (0,23)	0,96 (0,01)	58,6 (0,64)	14,1 (0,99)	27,3 (0,35)	41,63 (1,12)
	80 - 100	4,38 (0,06)	2,16 (0,01)	1,25 (0,01)	12,5 (0,08)	24,50 (0,02)	0,71 (0,13)	0,98 (0,01)	59,5 (1,73)	12,7 (1,10)	27,8 (0,63)	43,22 (0,40)
	100 - 120	4,29 (0,05)	2,14 (0,54)	1,23 (0,31)	12,39 (3,13)	24,53 (2,92)	0,52 (3,09)	0,99 (0,08)	61,94 (6,21)	11,15 (2,39)	26,91 (3,95)	43,78 (3,51)

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES SOLS

Les données sur les caractéristiques chimiques des sols déterminés sont : pH teneur en carbone organique (Corg), capacité d'échange cationique (CEC), et celles déduites sont : matière organique du sol (MOS) et le stock de carbone organique du sol (SCOS) sont consignés dans le tableau 2.

Le pH des sols de forêt décroît de l'horizon de surface (0-20 cm) à l'horizon le plus profond (100-120 cm), tandis que ceux des sols plantés d'hévéas de 10 ans augmentent de l'horizon de surface à l'horizon le plus profond. Les sols pH de sols plantés d'hévéas de 30 ans évoluent en dents de scie. Les sols plantés d'hévéas de 10 ans ont des pH plus élevés que ceux de 30 ans et des forêts respectivement pour tous les horizons, sauf celui de surface où l'ordre croissant des pH est : pH sol Hévéas 10 ans < pH sol forêts < pH sol Hévéas 30 ans. Les impacts sont positifs pour tous les sols et pour tous les horizons, sauf pour l'horizon de surface.

Le carbone organique dans les sols, exprimée ici en Corg (%), Corg (g/kg), stock de carbone organique dans le sol (SCOS en MgC (ha⁻¹) ou MOS (%) concerne une seule caractéristique. Ce qu'on dit sur Corg vaut aussi pour MOS et SCOS. Donc la teneur en carbone organique décroît de l'horizon de surface pour tous les modes d'occupation des sols à l'horizon le plus profond, sachant que les sols de forêt concentrent plus de carbone organique que les sols plantés d'hévéas de 30 ans et les sols plantés d'hévéas de 10 ans.

L'impact avec la caractéristique teneur en carbone organique sur les sols plantés d'hévéas de 30 ans, et d'avantage pour les sols plantés d'hévéas de 10 ans est négatif.

Les valeurs des stocks de carbone organique des sols sont, pour le premier mètre de profondeur sur l'ensemble des sols du Gabon, estimées à 106,6 MgCha⁻¹ (Wade *et al.*, 2019). La mesure de SCOS pour les sols forestiers de Kango est de 138,84 MgCha⁻¹, pour les sols plantés d'hévéas de 30 ans, le SCOS est de 90,18 MgCha⁻¹, et pour les sols plantés d'hévéas de 10 ans, le SCOS est de 78 MgCha⁻¹ pour le premier mètre de profondeur.

La CEC décroît avec la profondeur des sols quelque soit leur mode d'occupation (Tableau 2). La CEC de l'horizon de surface est plus élevée pour les sols plantés d'hévéas de 10 ans, que pour les sols plantés d'hévéas de 30 ans et des sols forestiers.

CARACTERISTIQUE ECOLOGIQUE

Indice de dégradation des sols (IDS)

L'indice de dégradation des paramètres physico-chimiques du sol varie en fonction de l'âge des plantations d'hévéa, et de la profondeur (Tableau 3). L'IDS montre une tendance générale à l'augmentation des valeurs négatives sur toutes les profondeurs des sites échantillonnés. De plus, les sols des hévéas de 10 ans ont des valeurs négatives plus importantes que les sols des hévéas de 30 ans. La dégradation des sols est plus intense dans les sols des hévéas de 10 ans que dans les sols des hévéas de 30 ans.

Tableau 3 : Indice de dégradation du sol (%) des plantations hévéas d'âges variés.

Soil degradation index (%) of rubber plantations of various ages.

Paramètres	Profondeur / sites					
	[0 – 40] cm		[40 – 80] cm		[80 – 120] cm	
	Hévéas 10 ans	Hévéas 30 ans	Hévéas 10 ans	Hévéas 30 ans	Hévéas 10 ans	Hévéas 30 ans
C-org	-57,09	-29,75	-50,72	-51,35	-57,37	-56,97
Da	29,45	9,82	20,21	15,96	21,83	17,77
Teneur en eau	-25,94	-12,35	-26,36	-12,02	-27,23	-12,48
pH	0,80	1,37	4,31	1,36	8,88	3,81
IDS cumulé	-52,79	-30,92	-52,55	-46,05	-53,89	-47,88

PARAMETRE CLIMATIQUE

Le tableau 4 montre que les sols des hévéas de 30 ans ont un potentiel de séquestration en carbone plus important que ceux des hévéas de 10 ans.

Potentiel de séquestration du carbone (CSP)

Tableau 4 : Potentiel de séquestration du carbone des sols des hévéas d'âges variés.

Carbon sequestration potential of soils of rubber trees of various ages.

Profondeur (cm)	Paramètres	Sites	
		Hévéas 10 ans	Hévéas 30 ans
[0-40]		-13,64	-2,52
[40-80]	CSP	-10,90	-3,92
[80-120]		-11,78	-4,05
	CSP cumulé	-36,32	-10,49

ANALYSES STATISTIQUES

Le tableau 5 montre les principales statistiques de chacune des variables sur l'ensemble des profils des sols des hévéas et des sols des forêts secondaires dans le périmètre de Siat Kango.

Statistiques descriptives

Tableau 5 : Principales statistiques des variables analysées.

Main statistics of the variables analyzed .

Paramètres	pH	Da	MOS	Corg	SCOS	CEC	Clay	Silt	Sand	Teneur en eau
Min	4,29	0,78	0,80	4,62	11,00	0,52	32,00	11,15	25,40	25,48
1st Qu	4,41	0,96	1,10	6,38	14,50	0,93	43,58	14,70	28,20	30,07
Median	4,46	1,03	1,40	8,10	17,07	1,65	45,80	17,65	32,50	34,44
Mean	4,47	1,03	1,75	10,17	19,80	3,09	47,58	20,04	32,38	34,73
3rd Qu	4,50	1,13	2,26	13,14	25,37	3,42	52,55	22,05	35,80	38,15
Max	4,78	1,21	3,47	20,12	31,39	12,30	61,94	34,50	38,80	43,78

Analyses en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composante principale (Figure 2) montre que les variables MOS, SCOS, Corg, et

CEC sont positivement corrélées à l'argile (Clay) et à la teneur en eau, mais négativement corrélées à la densité apparente (Da), au pH, au limon (Silt) et au sable (Sand).

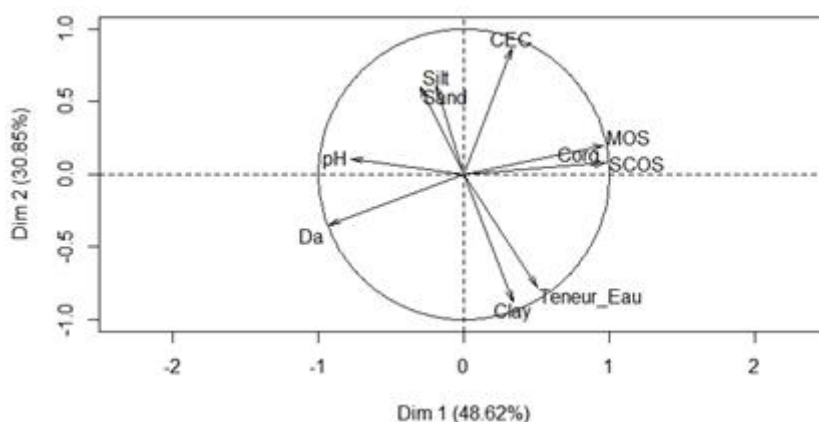


Figure 2 : Analyse des composantes principales des variables physico-chimiques des plantations d'hévéas et forêts à Kango, dans la Province de l'Estuaire, au Gabon..

Analysis of the main components of the physico-chemical variables of rubber plantations and forests in Kango, in the Estuary Province, Gabon.

En considérant les intervalles de profondeur (cm) 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100, et 100-120 de tous les sites échantillonnés, on peut distinguer l'existence de trois clusters (Figure 3) : D1 à D6, D7 à D12, et D13 à D18,

représentant respectivement les intervalles des profondeurs des sites des hêvées de 30 ans, des hêvées de 10 ans, et des forêts. Cependant, la distinction entre les hêvées 10 ans et ceux de 30 ans n'est pas très prononcée.

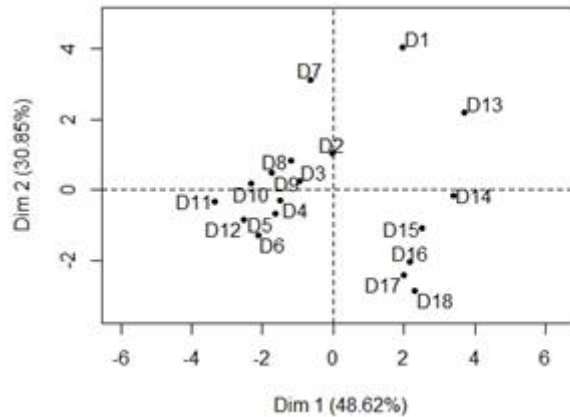


Figure 3 : Graphe de la distribution des individus (profondeurs) sur l'ensemble des sites.

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

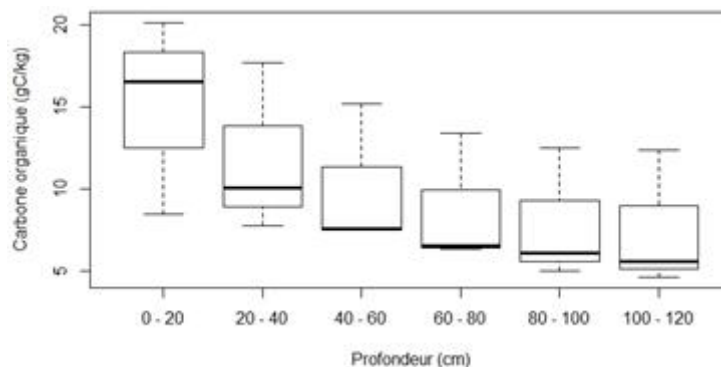


Figure 4 : Boîtes à moustaches du carbone organique en fonction de la profondeur.

Boxplots of organic carbon as a function of depth.

La figure 5 indique qu'il existe une variabilité des teneurs en carbone organique entre les sites des forêts et ceux des cultures d'hêvées.

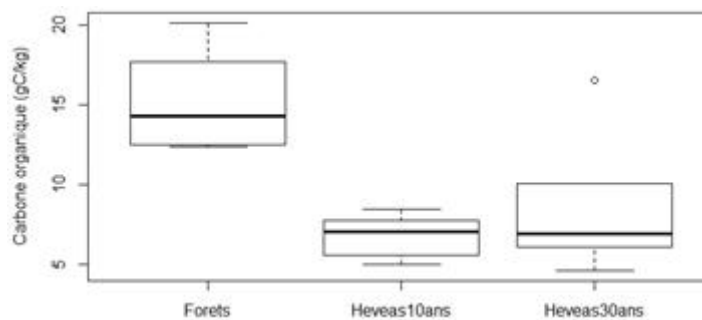


Figure 5 : Boîtes à moustaches du carbone organique en fonction des sites.

Boxplots of organic carbon according to sites.

Les tableaux 6 et 7 montrent respectivement les statistiques descriptives et les matrices de corrélation par types d'occupation des sols.

Tableau 6 : Statistiques descriptives par types d'occupation des sols.

Descriptive statistics by type of land use.

Modes d'occupation des sols	Paramètres	Profondeur	pH	Da	Corg	CEC	Argile	Teneur en eau
Forêts	Min	20	4,29	0,78	12,39	0,52	44,50	35,08
	1st Qu	40	4,36	0,86	12,71	0,79	54,05	37,52
	Median	60	4,39	0,94	14,26	1,56	57,30	40,02
	Mean	80	4,37	0,91	15,20	2,77	55,66	39,89
	3rd Qu	100	4,40	0,97	17,03	3,28	59,27	42,82
	Max	120	4,43	0,99	20,12	8,60	61,94	43,78
Hévéas 30 ans	Min	20	4,44	0,80	4,62	0,80	32,00	30,25
	1st Qu	40	4,46	1,00	6,15	1,27	39,33	33,30
	Median	60	4,47	1,09	6,93	1,90	42,30	35,21
	Mean	80	4,47	1,04	8,52	3,18	41,54	34,99
	3rd Qu	100	4,48	1,13	9,40	2,84	44,98	37,60
	Max	120	4,51	1,19	16,51	10,25	48,45	38,22
Hévéas 10 ans	Min	20	4,41	1,01	5,01	0,60	39,60	25,48
	1st Qu	40	4,47	1,10	5,83	0,95	44,33	28,41
	Median	60	4,59	1,13	7,02	1,30	45,55	29,47
	Mean	80	4,58	1,12	6,81	3,32	45,53	29,30
	3rd Qu	100	4,65	1,18	7,68	3,01	47,83	29,89
	Max	120	4,78	1,21	8,47	12,30	50,00	33,30

Tableau 7 : Matrices de corrélation des paramètres physico-chimiques des différents sites.

Correlation matrices of the physicochemical parameters of the different sites.

Paramètres	Profondeur	pH	Corg	CEC	Da	Argile	Teneur en eau
Forêt							
Profondeur	1						
pH	-0,70	1					
Corg	-0,95	0,53	1				
CEC	-0,87	0,54	0,95	1			
Da	0,95	-0,54	-0,99	-0,96	1		
Argile	0,93	-0,65	-0,96	-0,98	0,97	1	
Teneur en eau	0,98	-0,62	-0,97	-0,88	0,96	0,93	1
Hévéa 30 ans							
Profondeur	1						
pH	0,66	1					
Corg	-0,89	0,38	1				
CEC	-0,80	-0,26	0,97	1			
Da	0,93	0,41	-0,99	-0,95	1		
Argile	0,97	0,52	-0,97	-0,91	0,98	1	
Teneur en eau	0,97	-0,58	-0,92	-0,86	0,96	0,97	1
Hévéa 10 ans							
Profondeur	1						
pH	0,89	1					
Corg	-0,94	-0,96	1				
CEC	-0,78	-0,74	0,73	1			
Da	0,93	0,93	-0,96	-0,88	1		
Argile	0,97	0,86	-0,91	-0,88	0,97	1	
Teneur en eau	0,94	0,72	-0,79	-0,82	0,86	0,95	1

Une régression non linéaire de type exponentielle décroissante a été appliquée sur les données de profondeur, de densité apparente et de teneur

en carbone organique des sols, et la visualisation 3D a été réalisée pour apprécier le niveau de corrélation entre toutes ces données (Figure 6).

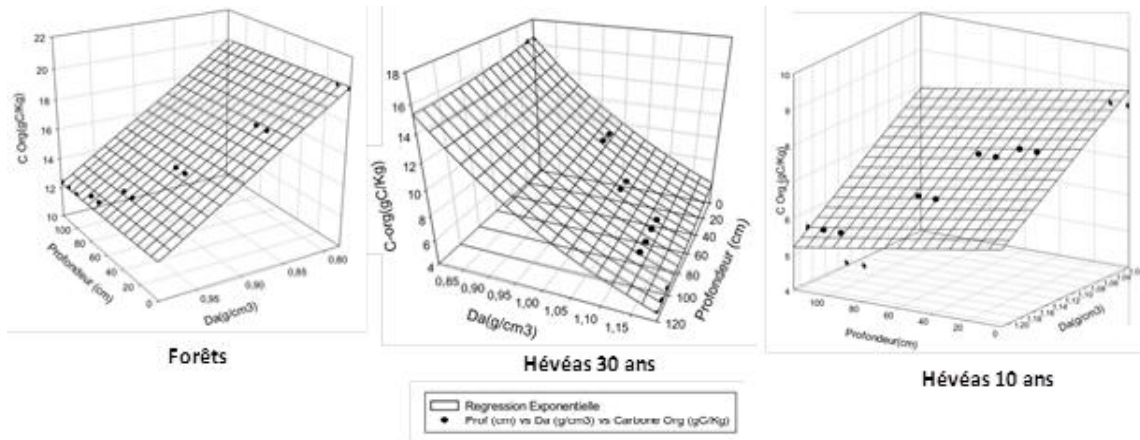


Figure 6 : Visualisation 3D de la régression non linéaire de type exponentielle.

3D visualization of the nonlinear regression of the exponential type.

La profondeur et la densité apparente (Da) ont été traitées comme facteurs prédictifs de la teneur en carbone organique du sol. L'équation non linéaire obtenue est la suivante :

$$Y = y_0 + a \cdot e^{-(bx)} + c \cdot e^{-(dz)}$$

Avec y_0 : Corg (g/kg) indépendant de Da et de la profondeur ; a : Corg maximum (g/kg) en fonction de la profondeur ; b : Constante

d'intensité (cm^{-1}) de la profondeur sur Corg ; c : Corg maximum dépendant de la Da ; d : Constante d'intensité (cm^3/g) de la Da sur Corg.

Le tableau 8 détermine les paramètres y_0 , a, b, c et d avec un coefficient de corrélation R^2 supérieur à 0,93 (elle est même de 0,99 pour la forêt et la plantation d'Hévée de 30 ans). Les résultats montrent une bonne corrélation entre les données expérimentales et le modèle mathématique.

Tableau 8 : Paramètres de régression non linéaire.

Nonlinear regression parameters.

Sites	Coefficient Corrélation		Paramètres			
	R^2	y_0	a	b	c	d
Hévées 30 ans	0,9959	-2,8498	1,8408	0,0100	119,1565	2,3893
Hévées 10 ans	0,9368	-129,9653	24,4638	0,0003	129,2662	0,1213
Forêts	0,9975	-104,0531	0,9951	0,0023	156,6677	0,3071

DISCUSSION

LA TEXTURE, LE PH ET LA DENSITE APPARENTE DES SOLS

La texture argileuse (% argile > 35 %), d'après la classification de la FAO 1968. La texture argileuse de tous les sols étudiés et sur les profils (0-120 cm), a une teneur moyenne de 45,80 % établie, avec des teneurs plus élevées pour les sols forestiers, puis ceux plantés

d'hévées de 10 ans et enfin ceux plantés d'hévées de 30 ans. Les données granulométriques obtenues sont cohérentes avec les résultats des travaux de reconnaissances pédologiques effectués entre 0 à 1,5 m de profondeur par Delhumeau (1969) dans la région de Kango. D'autres travaux plus récents, notamment ceux de Wade et al., 2019 montrent effectivement que dans les sols sous couverts forestiers du Gabon, on trouve des formations argileuses par endroit jusqu'à 2 m de profondeur. Du point de vue géologique, ces textures

appartiennent aux formations du Cocobeach inférieur d'âge néocomien à barrémien, mis en place au cours de la période de rifting liée à la formation du bassin intérieur (Thiéblemont *et al.*, 2009).

Le rôle du pH pour un sol donné est de créer un milieu favorable à la nutrition minérale des plantes et à leur croissance. Ce rôle est mieux rempli quand le pH est voisin de 7. Les sols ont des pH très acides (compris entre $4,34 \pm 0,06$ et $4,71 \pm 0,08$) ce qui constitue un paramètre favorable aux hévéas (Martin, 1981 ; Moreau, 2001 ; Doucet, 2006 ; Borah *et al.*, 2010). Les pH des sols plantés d'hévéas de 10 ans ont des valeurs plus élevées que ceux des sols plantés d'hévéas de 30 ans, et d'avantage des sols forestiers (tableau 2).

La densité apparente (D_a) est une indication de la structure d'un sol. Une faible D_a facilite la croissance des racines, la circulation de l'oxygène et de l'eau dans le sol (USDA, 1999). La D_a des sols tropicaux augmente avec la profondeur (Feller *et al.*, 2001 ; Wade *et al.*, 2019), et selon le type d'occupation des sols (forêt : $0,91 \pm 0,09 \text{ g/cm}^3$; hévéa 30 ans : $1,05 \pm 0,14 \text{ g/cm}^3$ et hévéas 10 ans : $1,13 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$). La D_a des sols forestiers est la plus faible, ce qui indique que la croissance racinaire est plus favorable (Selma *et al.*, 2014).

Les teneurs en eau varient selon l'occupation des sols (forêt : $39,89 \pm 3,67 \%$; hévéa 30 ans : $34,9 \pm 3,20 \%$ et hévéas 10 ans : $29,30 \pm 2,44 \%$). La CEC des sols plantés d'hévéas de 10 ans est plus élevée que celles des sols plantés d'hévéas de 30 ans et des sols forestiers. Tous ces résultats sont en accord avec ceux de N'guessan (2016) sur un même type de sol (ferralitique) dans une chronoséquence des plantations d'hévéas de 7 ans, 12 ans et 25 ans dans la région de Grand-Lahou en Côte d'Ivoire.

TENEURS ET STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE

L'analyse en composante principale (ACP) a montré une relation significative entre les variables de réponses (Corg, MOS, SCOS) et les variables explicatives (pH, D_a , Clay, teneur en eau). Les boîtes à moustaches montrent que les sites de forêts ont en général les valeurs des paramètres les plus élevées, notamment les stocks de carbone dans la mesure où ils représentent les milieux initiaux. La modélisation 3D met en évidence une parfaite corrélation entre la densité apparente, les

teneurs en carbone organique et les profondeurs d'échantillonnages. Les travaux de Guo et Gifford (2002) indiquent que les stocks de carbone des sols diminuent après la conversion de forêts natives en cultures (- 42 %), ou en plantations (-13 %). Cette décroissance rapide des stocks de carbone dans les sols mis en culture est liée à des entrées de carbone souvent moins élevées (Lal *et al.*, 2014) et à des taux de minéralisation des matières organiques plus intenses dues au travail des sols qui mélangent les horizons et détruisent une partie de l'agrégation (Wei *et al.*, 2014).

L'indice de dégradation des sols (IDS) montre que les paramètres physico-chimiques des sols des plantations d'hévéas âgés 10 ans sont plus fortement impactés que ceux des sols des plantations d'hévéas de 30 ans, dont les valeurs se rapprochent de celles des forêts qui représentent ici l'état initial du milieu. Ces résultats sont en accord avec les données obtenues respectivement par Dawoe *et al.*, (2014) et N'guessan (2016) dans une chronoséquence à cacaoculture réalisée au Ghana, et une chronoséquence à hévéaculture réalisée en Côte d'Ivoire, où il est mis en évidence des fortes valeurs négatives de l'indice cumulé de dégradation des sols qui diminuent par la suite avec l'augmentation de l'âge des différentes cultures. Ceci suggère donc que le temps écoulé pour la croissance des hévéas permettra un rééquilibrage des conditions physico-chimiques du milieu. Ainsi, plus l'âge des plantations des hévéas est important, plus leurs propriétés physico-chimiques se rapprochent ainsi de celles du milieu initial (forêts). Attard *et al.*, (2016) suggèrent que l'asymétrie observée entre les mécanismes liés à la perte rapide des stocks de carbone après mise en culture de sols de forêts, et ceux liés à la reconstruction lente de ces stocks dépend de l'installation et de la croissance lente des racines dans ces sols.

La différence d'âge entre les plantations d'hévéas affecte les teneurs de carbone organique du sol. Les fortes teneurs en carbone organique obtenues dans les plantations d'hévéa de 30 ans par rapport à ceux de 10 ans peuvent être causées par de grandes quantités de matières organiques issues des feuilles des hévéas (Geetha *et al.*, 2003). En effet, l'hévéa ajoute chaque année de la matière organique à la surface du sol grâce au dépôt de litière au cours de la défoliation, c'est-à-dire la chute de feuille en période froide. Étant donné que les effets de la défoliation commencent généralement lorsque

les arbres ont entre 4 et 5 ans (Geetha *et al.*, 2003). Ainsi, l'augmentation du carbone organique due au dépôt de litière de feuilles devient plus importante à mesure que les hévéas vieillissent. Ces différences de quantité de carbone organique s'observent également en profondeur en raison du système racinaire, bien plus développé dans les plantations d'hévéas les plus anciennes. Les travaux réalisés par Geetha *et al.*, (2003) montrent que, du fait d'une plus forte accumulation de la biomasse en profondeur dans les anciennes plantations que dans les jeunes plantations, les valeurs de carbone organique en profondeur seront par conséquent plus élevées dans les hévéas de 30 ans par rapport aux hévéas de 10 ans. Tous ces résultats indiquent donc une forte diminution de la dégradation des propriétés physico-chimiques du milieu suivant le vieillissement des plantations d'hévéas.

D'un point de vue climatique, le potentiel de séquestration du carbone montre que les sols des hévéas de 30 ans stockent de plus grandes quantités de carbone que les sols des hévéas de 10 ans. Cela est d'autant plus vrai que les sols de forêts représentent les sols ayant les propriétés physico-chimiques initiales du milieu.

CONCLUSION

L'étude de l'impact de la chronoséquence des plantations d'hévéas (10 ans et 30 ans) sur les sols de la région de Kango montre que la conversion de forêt en culture d'hévéa modifie fortement les paramètres physico-chimiques des sols. De nombreux paramètres des sols tels que la texture, les teneurs en eau et les stocks de carbone chutent après la conversion des forêts en cultures d'hévéa.

Les paramètres écologiques et climatiques tels que l'IDS (indice de dégradation des sols) et CSP (potentiel de séquestration de carbone) suggèrent que les sols sous des hévéas de 10 ans subissent plus de dégradation que ceux sous hévéas de 30 ans. Par conséquent les sols sous des hévéas de 30 ans stockent plus de carbone que les sols sous hévéas de 10 ans. Tout ceci montre une réduction de la dégradation des propriétés physico-chimiques des sols en fonction de l'âge croissant des cultures d'hévéa. Ainsi, plus les plantations des hévéas sont anciennes, plus l'acidité de leurs sols augmente, moins les sols se dégradent, et plus le carbone organique est préservé.

En perspective, il serait aussi intéressant de : (i) mesurer les teneurs en carbone des parties aériennes des hévéas, et (ii) étudier les peuplements de macro-invertébrés du sol sous les hévéas d'âges variés. Ces deux approches permettront d'évaluer l'impact de l'hévéaculture sur les peuplements de macro-invertébrés du sol et mieux cerner les facteurs influençant ces différents peuplements afin de comprendre le processus de réduction de la dégradation des sols avec l'âge croissant des plantations d'hévéa.

REMERCIEMENTS

La présente étude a été rendue possible grâce à l'appui de l'entreprise Siat Gabon en permettant l'accès à ses différents sites. Nous tenons aussi à remercier 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.

BIBLIOGRAPHIE

- Afnor, 2002. NF X31-105 - Qualité du sol – Détermination de la densité apparente
- Afnor, 2003. NF X31-107 - Qualité du sol - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol - Méthode à la pipette
- Afnor, 2005. NF ISO 10390 - Qualité du sol - Détermination du pH.
- Anna M. Wade, Daniel D. Richter, Vincent P. Medjibe, Allan R. Bacon, Paul R. Heine, Lee J.T. White, John R. Poulsen., (2019). Estimates and determinants of stocks of deep soil carbon in Gabon, Central Africa. *Geoderma* 341 (2019) 236 - 248.
- Attard E., Le Roux X., Charrier X., Delfosse O., Guillaumaud N., Lemaire G. et Recous S., 2016 - Delayed and asymmetric responses of soil C pools and N fluxes to grassland/cropland conversions. *Soil Biology & Biochemistry*, 97, pp. 31-39.
- Baran N, (2005). Suivre de la teneur en eau des sols dans les bassins du Gardon d'Andruze et Touch. Rapport final, *BRGM/RP-53654-FR*, 41p.
- Bertin Takoutsing, John C, Weber, Zacharie Tchoundjeu, Keith Shepherd., (2015). Soil chemical properties dynamics as affected

- by land use change in the humid forest zone of Cameroon. *Agroforest Syst.* DOI 10.1007/s10457-015-9885-8, 14p.
- Borah, K.K., Bhuyan, B., Sarma, H.P., (2010). Lead, arsenic, fluoride, and iron contamination of drinking water in the tea garden belt of Darrang district, Assam, India. *Environmental monitoring and assessment* 169, 347-352.
- Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C., McDaniel, P.A., 2011b. Soil genesis and classification. John Wiley & sons. 13:9780-8138-0769-0.
- Chauvel (A.), (1977). Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Évolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance. Thèse, université de Strasbourg. *ORSTOM, Paris. Coll. Trav. et Doc.*, n° 62, 532 pp.
- Chenu C., Plante A.F et Puget P., 2002. In : *Encyclopedia of soil science*. New York, USA : American Society of Agronomy, 1149-1176
- Delhumeau M., (1969). Carte pédologique de reconnaissance à 1/200.000. Notice explicative sur la feuille Libreville-Kango. *ORSTOM. Mission du Gabon., Libreville*, 69p.
- Dawoe EK, Quashie-Sam JS, Oppong SK (2014). Effect of land-use conversion from forest to cocoa agroforest on soil characteristics and quality of a Ferric Lixisol in lowland humid Ghana. *Agroforestry Systems*, 88: 119-127.
- Direction Générale de la Statistique (2015) : Résultats globaux du Recensement Général de la Population et des Logements de 2013 du Gabon (RGPL2013). Libreville, 61 pages + Annexes.
- Doucet, R., (2006). *Le climat et les sols agricoles*. ed. Berger, Eastman, Québec, xv, 443.
- Emma Cornwell, (2014). Effects of different agricultural systems on soil quality in Northern Limón province, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop*, Vol. 62 (3): 887-897.
- Feller C., Albrecht A., Blanchart E., Cadiboche Y. M., Chevallier T., Eschenbrenner V., Hartmann C., Larré-Larrouy M. C et N'Dandou J.F., 2001 – Soil organic carbon sequestration in tropical areas. General considerations and analysis of some edaphic determinants for Lesser Antilles soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 19 - 31.
- Geetha, N.; Jacob, J., (2003) - Changes in the biochemistry of leaves of tapped and untapped trees of *Hevea brasiliensis* during refoliation, maturation and wintering. *Indian Journal of Natural Rubber Research*, v. 16, n. 1/2, p. 85-92, 2003.
- Guo L.B. et Gifford R.M., 2002 - Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 8, pp. 345-360.
- Lal, R., 2014. Soil conservation and ecosystem services. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2, 36–47. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30021-6](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30021-6).
- 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, 30p.
- Mia Zhang, Xian-Hui Fu, Wen-Ting-Feng, Xiaoming Zou., 2007. Soil organic carbon in pure rubber and tea-rubber plantations in Southwestern China. *Tropical Ecology* 48(2): 201-207
- Mohamed Annabi, Haithem Bohr, Kawther Latiri., 2009. *Statut organique et respiration microbienne des sols du nord de la tunisie*. Biotechnologie, Agronomie, société et environnement. ISSN : 1370-6233 E-ISSN : 1780-4507.
- Moreau R (2001). Influence de la mise en culture et de la jachère forestière sur l'évolution des sols forestiers tropicaux, *Rapport d'activité OSRTOM, Montpellier*, 12p.
- Nagel J.L., Ebang Obiang M., Abouma Simba S, Tegye M. (2009). Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000, feuille Kango. Editions DGMG - *Ministère des Mines, du Pétrole et des Hydrocarbures*, Libreville, 59p.
- N'guessan K.K, (2016). Effet des plantations villageoises d'hévéa (*Hevea brasiliensis* Muell., Euphorbiaceae) sur les macroinvertébrés et les caractéristiques physico-chimiques du sol dans la région de Grand-Lalou (Sud-ouest ivoirien). *Mémoire de Master, Université Nangui Abrogoua de Côte d'Ivoire* ; 2016 - 61p.
- Nilovna C, P. K. Ramachandran Nair, Vimala D. Nair, Abhishek Bhattacharjee, Elias de Melo Virginio Filho, Rheinhold G. Muschler and Martin R. A. Nojonen (2020). Do Coûee Agroforestry Systems Always Improve Soil Carbon Stocks Deeper in the Soil ? A Case Study from Turrialba, Costa Rica. *Forest*, 2020 : 1-23.

- Recous S., 1995. Réponse des matières organiques des sols aux changements atmosphériques globaux. In Perrier A et Saugier B, eds. Actes du séminaire écosystèmes et changements globaux. Les dossiers de l'Environnement de l'INRA, 8 Paris, 81-85.
- Selma Regina Maggiotto, Dalziza de Oliveira, Celso Jamil Marur, Sonia Maria Soares Stivari, Monique Leclerc and Claudia Wagner-Riddle., 2014. Potential carbon sequestration in rubber tree plantations in the northwestern region of the Paraná State, Brazil. *Acta Scientiarum, Agronomy Maringá*, v. 36, n. 2, p. 239-245.
- Staff, S.S.D., (1993). Soil survey manual. United States Department of Agriculture.
- Stengel, P., Gelin, S., 1998. Sol: Interface fragile. INRA, Paris, 213 p.
- 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 1/1000 000. Editions DGMG - Ministère des Mines, du Pétrole, des Hydrocarbures, Libreville, 384 p.
- Tondoh EJ (2007). Effet de la mise en culture des forêts secondaires sur les peuplements de macroinvertébrés du sol dans la zone de contact forêt-savane de Côte d'Ivoire. *Sciences & Nature*, 2 (4) : 197-204.
- United States Department of agriculture, 1999. Soil quality test kit guide. Washington, DC, USA ; United States Department of Agriculture Soil Quality Institute.
- 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* ; 2012.- 334 p.
- Walker LR, Wardle DA, Bardgett ED, Clarkson BD (2010). The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development. *Journal of Ecology*, 98: 725-739., *Soil Science*, 37: 29-38.
- Walkley A. and C. A. Black., (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.
- Weil R.R et Magdoll F., 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and hearth. In ; soils organic matter in sustainable agriculture. Boca Raton, FL, USA : CRC Press.
- Wei X., Shao M., Gale W. et Li L., 2014 - Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. *Scientific Reports*, 4, 4062.
- Yoro (G.), Godo (G). (1990) - Les méthodes de mesure de la densité apparente : Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné. *Cahier de l'ORSTOM, série pédologie*, 25 (4) : 423-429.