

Stocks de carbone organique de sols en Haïti

Nord d'Haïti

W. Dorvil^(1, 2*), M. Brossard⁽²⁾, J.-L. Chotte⁽²⁾, C. Clermont-Dauphin⁽²⁾,
M. N. Rakotondrazafy⁽²⁾, et J.-M. Théodat⁽³⁾

- 1) Université d'État d'Haïti, Campus Henry Christophe de Limonade. 1130, Rte Nationale # 6 Limonade, Haïti
 - 2) IRD Eco&Sols, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France
 - 3) Université d'État d'Haïti, Faculté des sciences, URBATeR, URBALaB, Angle Rues Joseph et Mgr Guilloux, Port-au-Prince, Ouest, Haïti
- * Auteur correspondant : dorwely04@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Stocker du carbone organique dans le sol peut aider à restaurer efficacement la qualité des sols en Haïti, avec des avantages non seulement en termes de productivité et de durabilité de l'activité agricole, mais aussi en termes d'atténuation des changements climatiques. Cette étude propose pour la première fois une estimation de stocks de carbone organique de sols d'une région du nord d'Haïti dans quatre systèmes de culture précédemment analysés : un système intensif (SI), un système semi-intensif (SSI), un système agroforestier (SA) et un système de pâturage permanent (SSU). Suite à l'inventaire agraire, les calculs des stocks de carbone organique des sols ont été effectués pour 78 parcelles intégrant ces systèmes de culture. Nos résultats montrent une teneur en carbone organique moyenne de 2,83 g 100 g⁻¹ dans la couche 0-30 cm et de 1,93 g 100 g⁻¹ dans la couche 30-50 cm, et un stock moyen de 97,5±45,7 MgC.ha⁻¹ à 35,4±18,5 MgC.ha⁻¹ respectivement. Les stocks les plus élevés (couche 0-30) sont observés dans le système agroforestier SA (113,3±59,3 MgC.ha⁻¹) et les plus faibles dans le système de pâturage permanent SSU (87,4±41,2 MgC.ha⁻¹). Le stock organique de la couche 0-30 cm varie de 38,3±16,4 MgC.ha⁻¹ pour les Haplic Cambisols à 119,45±55,6 MgC.ha⁻¹ pour les Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols. Dans la couche 0-50 cm, il varie de 112,0±37,0 MgC.ha⁻¹ dans les versants à 150,2±40,1 dans les vallées. Si l'effet des types de sol sur le niveau du stock peut être retenu en première analyse, un effet des systèmes agroforestiers présents pour la couche 0-50 cm est documenté. La nature calcique ou carbonatée des sols est prégnante et devra être explorée pour une meilleure compréhension de l'évolution des stocks de carbone organique de cette région fortement soumise à une agriculture en voie d'intensification.

Mots-clés

Agroforesterie, système intensif, système semi-intensif, pâturage permanent, fertilité, qualité des sols, zone tropicale humide, matière organique.

Comment citer cet article :

Dorvil W., Brossard M., Chotte J.-L., Clermont-Dauphin C., Rakotondrazafy M. N. et Théodat J.-M., 2024 - Stocks de carbone organique de sols en Haïti : analyse de l'effet de systèmes de culture de la commune de Saint-Raphaël, Nord d'Haïti, *Étude et Gestion des Sols*, 31, 43-58

SUMMARY**SOIL ORGANIC CARBON STOCKS IN HAITI: ASSESSING THE EFFECT OF CROPPING SYSTEMS IN THE COMMUNE OF SAINT-RAPHAËL, NORTH OF HAITI**

Storing organic carbon in soil can effectively help to restore soil quality in Haiti, with benefits not only in terms of productivity and sustainability of agricultural activity, but also in terms of climate change mitigation. This study proposes for the first time an estimate of soil organic carbon stocks in the northern Haiti in four cropping systems previously analyzed: an intensive system (SI), a semi-intensive system (SSI), an agroforestry system (SA) and a permanent grazing system (SSU). Soil organic carbon stocks were calculated for 78 plots integrating these cropping systems. Our results show an average organic carbon content of $2.83 \text{ g } 100^{-1}$ in the 0-30 cm layer and $1.93 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ in the 30-50 cm layer, and an average stock of $97.5 \pm 45.7 \text{ MgC.ha}^{-1}$ and $35.4 \pm 18.5 \text{ MgC.ha}^{-1}$ respectively. The highest stocks (0-30 cm) are observed in the agroforestry system SA ($113.3 \pm 59.3 \text{ MgC.ha}^{-1}$) and the lowest in the permanent grazing system SSU ($87.4 \pm 41.2 \text{ MgC.ha}^{-1}$). The organic stock of the 0-30 cm layer ranges from $38.2 \pm 16.4 \text{ MgC.ha}^{-1}$ for Haplic Cambisols to $119.45 \pm 55.6 \text{ MgC.ha}^{-1}$ for Rendzic Leptosols and Epileptic Cambisols. In the 0-50 cm layer, it ranges from $112.0 \pm 37.0 \text{ MgC.ha}^{-1}$ in slopes to $150.2 \pm 40.1 \text{ MgC.ha}^{-1}$ in lowlands. If the effect of soil types can be retained at first analysis, we highlight an effect of the agroforestry on the stocks levels down to 0.5 m depth. The calcic or carbonate nature of soils is dominant and should be explored for a better understanding of the evolution of organic stocks in this region strongly subject to the agricultural footprint under intensification.

Key-words

Agroforestry, intensive system, semi-intensive system, permanent pasture, fertility, soil quality, tropical humid zone, organic matter.

RESUMEN**ESTOQUES DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE HAÍTÍ: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE SISTEMAS DE CULTIVO EN LA COMUNA DE SAINT-RAPHAËL, NORTE DE HAÍTÍ**

El almacenamiento de carbono orgánico en el suelo puede ayudar a restaurar eficazmente la calidad del suelo en Haití, con beneficios no solo en términos de productividad y sostenibilidad de la actividad agrícola, sino también en términos de mitigación del cambio climático. Este estudio propone por primera vez una estimación de las reservas de carbono orgánico de suelos de una región del norte de Haití en cuatro sistemas de cultivo previamente analizados: un sistema intensivo (SI), un sistema semi-intensivo (SSI), un sistema agroforestal (SA) y un sistema de pastoreo permanente (SSU). Los cálculos de las reservas de carbono orgánico de los suelos se realizaron para 78 parcelas que integran estos sistemas de cultivo. Nuestros resultados muestran un contenido medio de carbono orgánico de $2,83 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ en la capa 0-30 cm y de $1,93 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ en la capa 30-50 cm, y estoques medios de $97,5 \pm 45,7 \text{ MgC.ha}^{-1}$ a $35,4 \pm 18,5 \text{ MgC.ha}^{-1}$, respectivamente. Los estoques más elevados de la capa 0-30 cm se encuentran en el sistema agroforestal SA ($113,3 \pm 59,3 \text{ MgC.ha}^{-1}$) y los más bajos en el sistema de pastoreo permanente SSU ($87,4 \pm 41,2 \text{ MgC.ha}^{-1}$). El estoque orgánico de la capa 0-30 cm varía de $38,3 \pm 16,4 \text{ MgC.ha}^{-1}$ para los Haplic Cambisols a $119,4 \pm 55,6 \text{ MgC.ha}^{-1}$ para los Rendzic Leptosols y Epileptic Cambisols. En la capa 0-50 cm, los estoques varían de $112,0 \pm 37,0 \text{ MgC.ha}^{-1}$ en las laderas a $150,2 \pm 40,1 \text{ MgC.ha}^{-1}$ en situaciones en los valles. Si bien el efecto de los tipos del suelo puede considerarse en primer análisis, observamos un efecto de los sistemas agroforestales sobre los niveles de estoques orgánicos medidos hasta una profundidad de 0,5 m. La naturaleza cálcica o carbonatada de los suelos es llamativa y deberá explorarse para una mejor comprensión de la evolución de los estoques orgánicos de esta región fuertemente sometida a una actividad agrícola en vías de intensificación.

Palabras clave

Sistema agroforestal, sistema intensivo, sistema semi-intensivo, sistema de pastoreo permanente, fertilidad, calidad del suelo, zona tropical húmeda, materia orgánica.

1. INTRODUCTION

Les sols mondiaux sont les plus grands réservoirs de carbone des continents estimés à 2400 gigatonnes (Gt) contre 860 Gt pour l'atmosphère et 600 Gt pour la végétation (Le Quéré *et al.*, 2018; Chevallier *et al.*, 2020; Chenu *et al.*, 2022). Parmi les multiples fonctions (Eglin *et al.*, 2021) qu'ils assurent, on peut citer les cycles de nutriments et le contrôle de la composition chimique de l'atmosphère corolaire de la régulation du climat local et global (Jobbágy et Jackson, 2000; FAO et ITPS, 2015).

La matière organique du sol (MOS) contribue au maintien des propriétés fonctionnelles du sol et à la productivité végétale. Son importance n'est plus à démontrer en particulier dans les environnements morphopédologiques tropicaux. Elle augmente la capacité de stockage et la disponibilité de l'eau pour les plantes, protège le sol de l'érosion et favorise un habitat pour les organismes du sol (Calvaruso *et al.*, 2020). Il a été démontré que le carbone et l'évolution des stocks de carbone organique (COS) dans les écosystèmes terrestres constitueraient un enjeu majeur dans les efforts visant à contrôler la dégradation des terres et à préserver la biodiversité (Houssoukpèvi *et al.*, 2022). L'une des causes de la dégradation des terres est liée aux phénomènes érosifs que subissent les sols, en particulier ceux situés sur pentes en Haïti (Velasco *et al.*, 2018). D'ailleurs, Feller *et al.* (2006) l'ont bien démontré en indiquant un stock de COS inférieur à 30 MgC ha⁻¹ dans les sols érodés d'Haïti. Cette dégradation peut être aussi due à des causes anthropiques liées à des pratiques agricoles inappropriées dans les versants, provoquant une baisse de la couverture végétale (Dolisca *et al.*, 2007). À noter que lorsque les sols sont dégradés, cette dégradation affecte toutes leurs propriétés : physiques, chimiques, biologiques et écologiques. Leur potentiel de fertilité est ainsi remis en cause. Pour parvenir à une production soutenue et durable des agroécosystèmes, le maintien, voire l'augmentation, des stocks de carbone organique des sols, nécessite d'identifier des pratiques agricoles adaptées aux conditions locales qui augmentent les flux d'entrée de C dans les sols et/ou en diminuent les flux de sortie (Kätterer *et al.*, 2011; Derrien *et al.*, 2016).

Durant ces deux dernières décennies, de nombreuses études ont montré que le maintien du réservoir du stock de COS implique le transfert du CO₂ vers le sol par les plantes via une gestion des terres et des systèmes de culture et le contrôle efficace de l'érosion. À ce titre, citons, entre autres, les études de Balesdent *et al.* (2000), de Feller et Chenu (2012), de Minasny *et al.* (2017), de Lal (2020). D'autres études, comme celles de la FAO (2017), de Ramesh *et al.* (2019), de Chenu *et al.* (2014) et de Chevallier *et al.* (2020), suggèrent le potentiel d'une diversité de pratiques séquestrantes de COS, comme le travail superficiel, l'agroforesterie, les cultures intermédiaires, les haies, les bandes enherbées, etc.

Comparées à d'autres régions, les études mettant en relation les systèmes de culture et le stock de COS ont été peu développées en région caraïbéenne. On peut citer les travaux de Feller *et al.* (1990, 2006), d'Albrecht *et al.* (1992) et de Dulormne *et al.* (2000). En Haïti, ces travaux, basés sur l'effet de la minéralogie et la texture du sol sur la variation des stocks de C dans la région Sud, avaient pris en compte des systèmes de culture annuels (céréales + légumineuses) et des systèmes de culture en jachère courte. Les systèmes de jardin de case agroforestier n'avaient pas été pris en compte. De plus, seul l'horizon de surface du sol (0-20/0-30 cm) avait fait l'objet de calculs des stocks de C. Les agroécosystèmes haïtiens, en particulier les systèmes agroforestiers, n'ont encore fait l'objet d'aucune étude systématique susceptible d'aider à documenter l'effet de tous les systèmes de culture sur le stock de COS. Nous proposons dans cette étude d'élargir la gamme des systèmes de culture étudiés. Notre travail devrait permettre d'apprécier la variabilité des stocks de COS en fonction des systèmes de culture et des types de sols. Il devrait également compléter les inventaires agraires et ainsi améliorer les connaissances sur les pratiques des agriculteurs vis-à-vis de la matière organique en vue de répondre aux grands enjeux de sécurité alimentaire, d'adaptation et d'atténuation au changement climatique, et de maintien de la fertilité des sols. Il est donc essentiel de disposer de valeurs de référence relatives au stock de COS des systèmes existants.

Cette étude vise à fournir une première estimation du stock de COS jusqu'à 50 cm de profondeur dans le cadre d'un inventaire d'une série de systèmes de culture du nord d'Haïti précédemment décrits (Dorvil *et al.*, 2023).

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Zone d'étude

L'étude a été réalisée entre mars 2020 et juillet 2022 sur le territoire de Saint-Raphaël (19°17'51,02 N, 72°04'15,17 O), commune du Nord d'Haïti (Figure 1a) d'une superficie de 184 km².

Les lithologies sont dominées par des matériaux sédimentaires calcaires, ensembles constitués par des calcaires massifs et crayeux de l'Éocène, des calcaires crayeux de l'Oligocène et des marnes du Miocène (BME, 2005). Les sols de la couverture pédologique peuvent être rattachés (IUSS-WRB, 2014) aux Leptosols et aux Régosols sur les versants calcaires, et aux Vertisols et Gleysols dans les situations des plateaux. Des Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols (RELEC) sont également observés sur affleurements calcaires des vallées. Les Haplic Cambisols (Eutric ou Calcaric) se rencontrent dans les versants de la section communale de Mathurin. Les bas de

versants présentent des situations variées, mais l'ambiance géochimique est dominée par les carbonates.

Le climat, de type tropical Aw maritime (Peel et al., 2007), tempéré et uniformisé par l'alizé, est chaud et humide avec deux saisons contrastées: une saison pluvieuse allant d'avril-mai jusqu'à septembre-octobre et une saison sèche allant d'octobre-novembre à avril. La région est soumise aux cyclones. L'altitude et l'exposition aux vents dominants contrôlent la pluviosité. Entre 2020 à 2021, la pluviométrie moyenne annuelle enregistrée est de 1 098 mm (Station de Saint-Raphaël). En ce qui concerne la température, nous n'avons pu avoir accès qu'aux données de l'année 2020: la température moyenne journalière pour cette année était de 27 °C et a varié de 23 à 32°C.

Quatre systèmes de culture coexistent sur ce territoire (Dorvil et al., 2023): un système intensif (SI) situé sur un plateau irrigué

(370 m d'altitude) à prédominance de cultures maraichères et de riz; un système semi-intensif (SSI) positionné sur un plateau non irrigué (350 m d'altitude) à prédominance de canne à sucre, de maïs et de pois-congo; un système agroforestier (SA) dans les vallées et bas de versants (aux altitudes voisines de 450 m) essentiellement dominé par l'igname, la banane et le cacaoyer, et un système de pâturage permanent (SSU) sur les versants (500-800 m d'altitude). Le *tableau 1* donne des informations sur les itinéraires techniques et éléments clefs sur la gestion de la matière organique (MOS).

Nous n'avons pas observé l'usage de matières organiques exogènes dans le système intensif. Dans les versants, quelques structures antiérosives sont observées, constituées de gabions et de bandes enherbées. La végétation naturelle plus ou moins dense, située dans la limite séparant les sections Mathurin et

Tableau 1 : Synthèse des données relatives aux historiques d'usages des terres et à la dynamique de la MOS à Saint-Raphaël (d'après Dorvil et al., 2023).

Table 1: Summary of data related to land use history and the dynamics of SOM in Saint-Raphaël (After Dorvil et al., 2023).

Pratiques	SI	SSI	SA	SSU
Avant 1950	Canne-à-sucre, Coton et Tabac, Cultures annuelles (maïs, sorgho, pois inconnu)	Canne-à-sucre, cultures annuelles, Haricot, Pois inconnu, Tabac	Igname, Banane, Café, Cacao Haricot, Pois-congo,	Végétation naturelle/Rack* et sols nus aussi
Superficie avant 1950**	> 2 ha av. 1950	≥ 3 ha	≥ 5 ha	> 10 ha
Superficie actuelle**	0,4-1,5 ha	0,6-2 ha	≥ 1,5	10 ha
Densité des arbres	5/ha (± dense av 1950)	≥ 10/ha	26-36	Variés (0-50)
Labour/an et type	3-4 (mécanique et traction animale)	1-2 (traction animale)	1 sur 3 ans (manuel)	0
Irrigation	Oui (1952-introduction culture Riz)	Non	Non	Non
Usage de pesticides/dose	30 l ha-1 an ⁻¹	7,5 l ha-1 an-1	2,5 l ha-1 an-1/occas.	0
Usage d'engrais/dose	1,6 t ha-1 an ⁻¹	0,36 t ha-1 an-1	0	0
Cultures associées	0 (maraichères en pur, Riz en pur) – 2 maïs-pois-congo)	5	9	0
Durée de la jachère (mois)	1	4-6	0	Caprin, bovin
Rotation des légumineuses	Peu valorisée	Moyenne	Forte	Non
Élevage	Libre av. 1950 en jachère, cochon créole, ovin, caprin	cochon créole, ovin, caprin, bovin, équin	Bovin, caprin, porc, volaille (parcage de nuit)	Bovin, caprin, équin
Amendement organique	Très faible	± (résidus de cult.)	Elevé	Faible/élevé
Brûlis des résidus	Oui (Après récolte)	Occasionnel	0	Souvent
Localisation	Plateau irrigué	Plateau non irrig.	Vallée/piedmont	Pente
Conservation des sols	Aucune /ouvrages hydrauliques	Modérée	Végétation dense	Très peu de structures

SI : système intensif ; SSI : syst. semi-intensif ; SA : syst. agroforestier ; SSU : syst. de pâturages permanents ou sans usage.

* : recru naturel mésophile, ** : superficie moyenne.

Bouyaha, est dominée par des espèces mésophiles (*Spondias monbin*, *Bursera simaruba* et *Prosopis juliflora*). Les cultures maraîchères comme le poireau, l'oignon, la betterave et la carotte sont couramment observées sur une même parcelle en association. On n'observe pas de légumineuses pérennes (*Glyricidia sepium* et *Leucena leucocephala*) dans la zone. La couverture arborée est dominée par les espèces suivantes: *Mangifera indica*, *Persea americana*, *Catalpa longisima*, *Simaruba glauca*, *Roystonea regia*, *Melicococus bijugatus*, *Samanea saman*, *Terminalia catappa*, *Guarea trichilioides*, *Inga vera*, *Sweitena mahagoni*, *Ura crepitans*, *Anona squamosa*.

Échantillonnage des sols

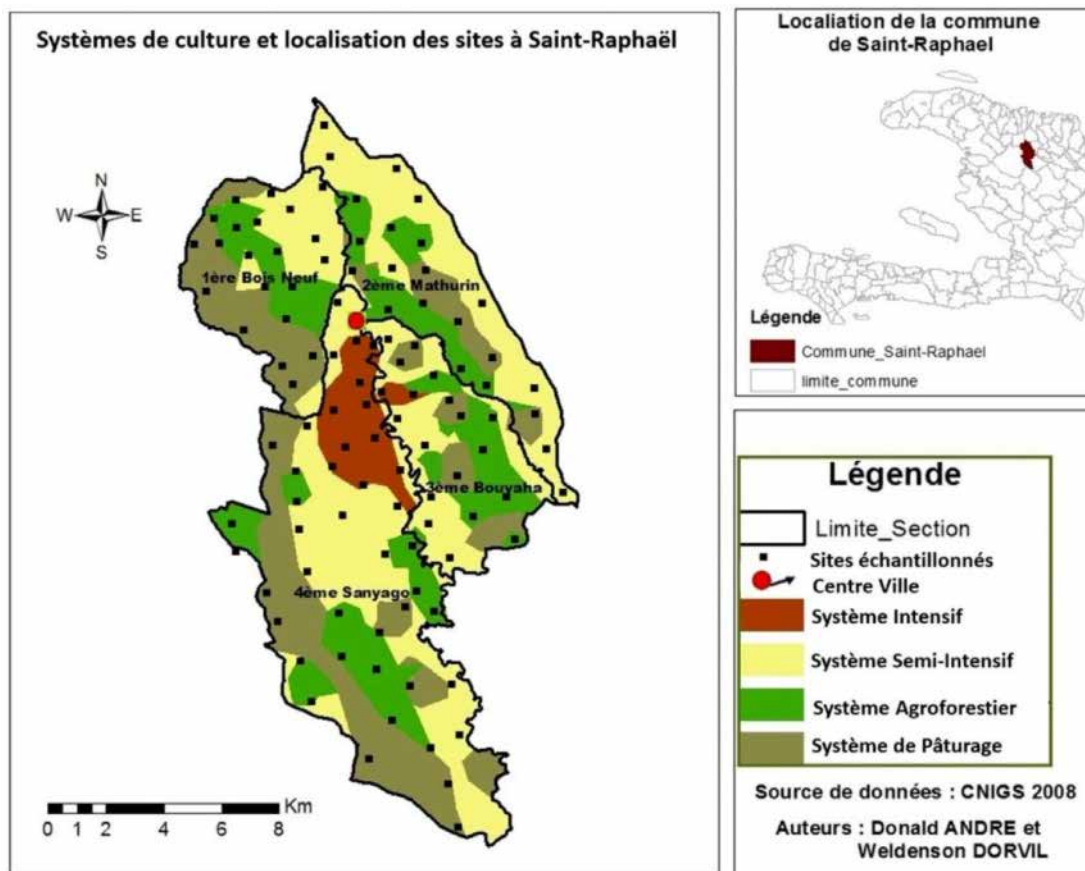
Deux campagnes d'observation-descriptions et de prélèvements d'échantillons de sols ont été réalisées sur 78 parcelles paysannes (Figure 1). Ainsi, 11 parcelles ont été sélectionnées dans le système de pâturage permanent (SSU), 24 dans le système agroforestier (SA), 20 dans le système de

culture intensif (SI) et 23 dans le système semi-intensif (SSI). Toutes les parcelles ont été géoréférencées (Figure 1) Outre l'ancienneté des systèmes de culture, les parcelles devaient se situer dans les zones agroécologiques déterminées antérieurement, et l'inventaire devait permettre de couvrir dans la mesure du possible l'ensemble du territoire (Dorvil et al., 2023). Ensuite, au moment des inventaires pour le carbone, l'autorisation/volontariat des exploitants était nécessaire. Il n'y a donc pas eu de stratégie de mise en place d'une grille systématique de choix des sites, ni de tirage aléatoire à partir de l'inventaire agricole. L'échantillonnage résulte donc d'un compromis entre la couverture géographique, la couverture des sols et des systèmes de culture, et la faisabilité de l'implantation.

Une fosse pédologique a été ouverte au milieu de chaque parcelle. Au total, 262 échantillons composites pour l'ensemble des 78 parcelles ont été prélevés. Un échantillon de sol composite est constitué d'un mélange de prélèvements réalisés à la tarière sur 25 emplacements aléatoires, répartis sur une surface d'un hectare, et mélangés de façon séparée

Figure 1 : Distribution des systèmes de cultures et localisation des sites inventoriés.

Figure 1: Distribution of cropping systems and location of inventoried sites.



La délimitation des limites des systèmes a été effectuée sur le terrain (d'après CHCL et al., 2020)

pour les couches 0-30 cm et 30-50 cm. La fosse pédologique est incluse dans les 25 répétitions effectuées pour constituer l'échantillonnage composite. Ces profondeurs ont pu être réduites en cas de forte pierrosité (GIEC, 2006; ISO 23400, 2021). Les échantillons composites ont été utilisés pour les déterminations suivantes: granulométrie, pH, carbone/azote totaux. Des prélèvements sur les fosses ont été réalisés pour les mesures de densité apparente (Da).

Mesure de densité apparente (Da)

Deux méthodes de prélèvement ont été utilisées: (i) la méthode à l'eau (Betemariam *et al.*, 2011) appliquée sur 42 parcelles (parcelle 1 à 42) où les prélèvements ont été effectués suivant trois couches d'épaisseur 0-10 cm, 10-30 cm et 30-50 cm. La limite de profondeur des prélèvements est fonction des conditions du milieu, pente et pierrosité/rochiosité. Cette méthode a été adoptée dans les parcelles où l'usage des cylindres métalliques était impossible. (ii) La méthode du cylindre (parcelles 43 à 78) consiste à utiliser le carottier à Da avec des volumes différents (75 cm³; 87,5 cm³; 222,5 cm³) selon les couches et les contraintes du terrain de 0 à 50 cm. Les masses sèches ont obtenues après 48 heures de séchage à 105 °C à l'étuve ventilée. La fraction d'éléments grossiers (> 2 mm) a été séparée de la terre fine (≤ 2 mm) par tamisage à 2 mm. Les éléments grossiers ont ensuite été pesés à l'état sec après une nouvelle séquence de 24 heures de séchage à 105 °C. La Da sèche totale est exprimée en g cm⁻³.

Détermination de la teneur en carbone organique total (COT) et calcul des stocks de carbone

Les mesures de la concentration en carbone total (CT) et azote total de la terre fine des sols prélevés ont été effectuées par combustion sèche à l'aide d'un analyseur de type CHN [UMR-Eco&Sols, FIONS EA 1108 (NF ISO 10694, 1995, et NF ISO 13878, 1998)]. Les tests à l'acide chlorhydrique sur le terrain montrant des conditions calcaires ou calciques, le carbone inorganique total (CIT) a été déterminé. Le contenu en carbonates totaux (CaCO₃) permet de calculer la fraction inorganique (CIT) du carbone total de l'échantillon si l'on suppose que le carbone inorganique provient exclusivement du CaCO₃. Il a été déterminé par le volume de gaz émis par oxydation de l'échantillon à l'acide chlorhydrique dilué au 1/3 à l'aide du calcimètre de Bernard (ISO 10693, 1998). Le carbone organique total (COT) a été calculé à partir de la formule:

$$COT = CT - CIT \quad (1).$$

Le COT total pour la couche de sol 0-50 cm résulte de la moyenne des COT pour les couches 0-30 cm et 30-50 cm.

Pour estimer le stock de carbone organique d'une couche donnée (COS) il a été utilisé l'équation suivante (ISO, 2021):

$$COS = COT * Da * H * ((1 - E)^{0,1}) \quad (2)$$

où: COS: Carbone organique du sol en MgC.ha⁻¹; COT: la concentration en carbone organique total en gC.100 g⁻¹ de la terre fine; Da: densité apparente en g.cm⁻³; H: épaisseur de la couche considérée en cm et E: proportion d'éléments grossiers de la couche.

Le stock d'un sol donné est la somme des stocks des différentes couches prélevées. Les stocks sont calculés en utilisant les Da des fosses et les teneurs en carbone des échantillons composites.

Autres paramètres physico-chimiques mesurés

Sur les échantillons composites ont été déterminés (Laboratoire du Campus Henry Christophe, Limonade, Haïti) le pH (ISO 10390, 2021) et la granulométrie. Lors de l'analyse mécanique, les fractions des sables sont obtenues par tamisage à sec, les fractions « argile et limon » sont déterminées par la méthode de l'hydromètre.

Analyses statistiques

La comparaison des stocks de carbone des sols et d'autres paramètres selon les facteurs étudiés a été réalisée par l'analyse de variance. Le test de Fisher LSD a été ajouté en vue de montrer des différences significatives pour les teneurs en carbone organique. Le test de normalité de Kolmogorov-Smirnov et Lilliefors a été utilisé. L'ensemble des tests est réalisé à l'aide du logiciel statistique STATISTICA 7 (Hilbe, 2007).

3. RÉSULTATS

Principales propriétés physico-chimiques des sols

Les sols échantillonnés présentent en moyenne une texture argileuse (*Tableau 2*), dont il faut pondérer le caractère tant la variabilité des données est importante. Les valeurs moyennes de densité apparente des sols sont élevées > 1,2 g cm⁻³. Le pH des sols est neutre (6,5-7,5) à basique (7,5-8,7). Dans la couche 0-30 cm, la teneur moyenne en azote total est de 0,24 g kg⁻¹. Jugée faible, on voit seulement 11,5 % des profils avec une teneur supérieure à 0,4 gN.kg⁻¹. Notons également que les différences entre 0-30 et 30-50 cm de profondeur sont significatives (p < 0,05) pour la teneur en Ntotal. Les teneurs en carbone total (CT) sont élevées, mais portées par les contenus

de carbone inorganique (CIT). Globalement, le rapport C/N montre un niveau de seuil normal dans la couche 0-30 cm mais très faible dans les Régosols, Gleysols et les Leptosols (< 8).

Les densités apparentes

La densité apparente dans la couche de sol 0-50 cm varie de 0,76 à 2,09 g cm⁻³ avec une moyenne de 1,32±0,34 et une médiane de 1,32 g cm⁻³ (Figure 2a). Elle varie de 1,27 g cm⁻³ en SSU à 1,38 g cm⁻³ en SA. Ces mesures montrent une distribution

normale. Les Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols ont une Da moyenne de 1,25 et les Vertisols de 1,30 g cm⁻³. La figure 2b présente les moyennes homogènes des deux méthodes de prélèvement. Nous n'observons pas de différences significatives des Da entre les systèmes de culture (Figure 2c).

Figure 2 : Histogramme de distribution des valeurs de densité apparente (Da en g cm⁻³) de la couche 0-50 cm des 78 parcelles (a) ; distribution des Da avec les deux méthodes de mesure (b) ; comparaison des moyennes des valeurs de Da par système de culture de la couche 0-30 cm (c).

Figure 2: Histogram of the soil bulk density (Da values in g cm⁻³) of the 0-50 cm layer of the 78 plots (a); Da values distribution with the two methods of measurement (b); mean da values comparisons within the crop systems, 0-30 cm layer (c).

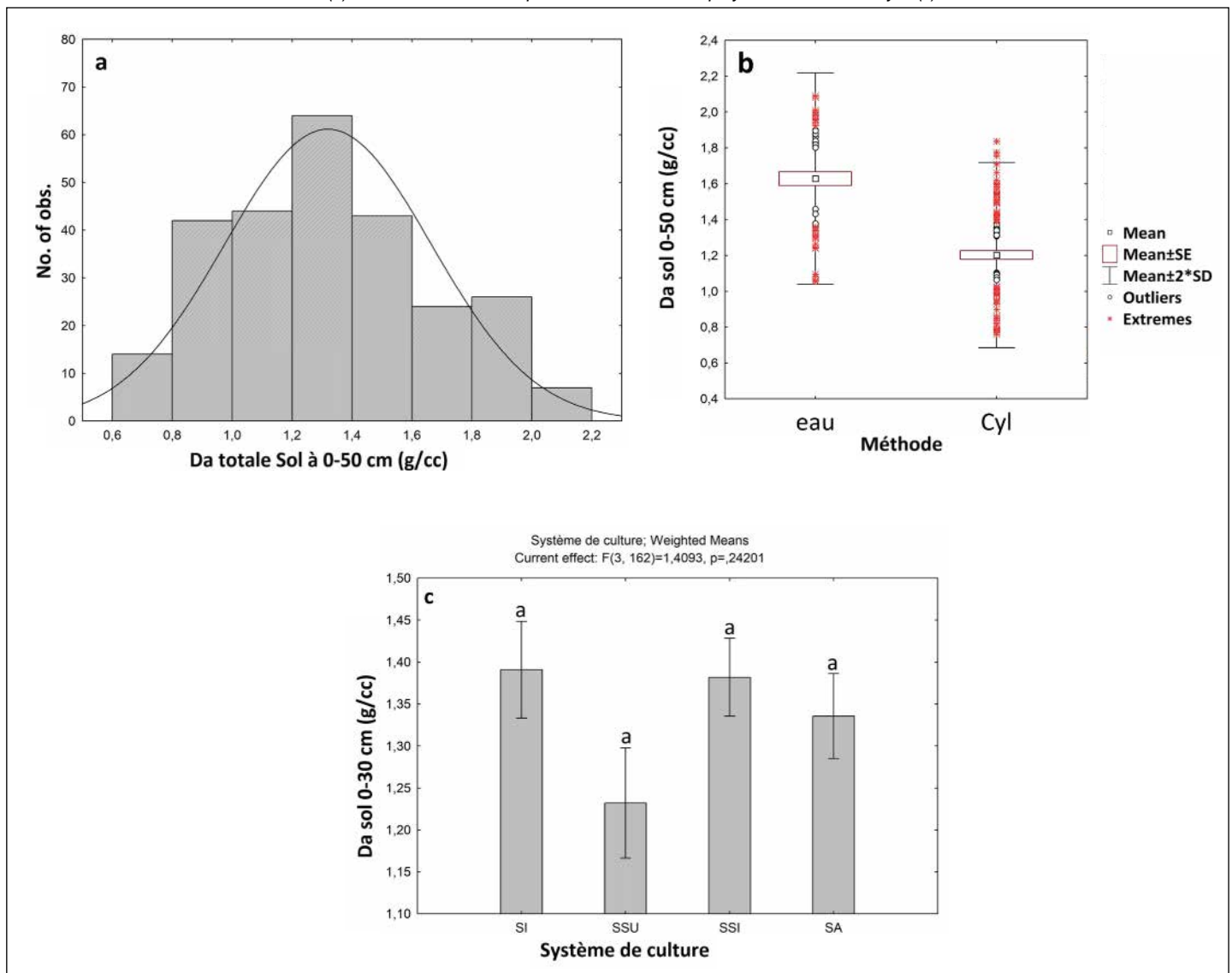


Tableau 2 : Principaux paramètres physico-chimiques des sols.**Table 2:** Main physico-chemical parameters of soils.

Paramètres	N	Prof. (cm)	Moy.	Méd.	E-t.	Min.	Max.	Effet profondeur
Argile (g 100 g ⁻¹)	78	0-30	49,12	42,5	14,5	12,5	85,0	
Limon (g 100 g ⁻¹)	78	0-30	35,5	35	9,8	10	65	
Sable (g 100 g ⁻¹)	78	0-30	15,38	22,5	15,16	0,0	72,5	
Da sol (g cm ⁻³)	78	0-30	1,34	1,31	0,345	0,76	2,21	NS**
		30-50	1,20	1,28	0,45	0,76	2,09	
pH eau	78	0-30	7,9	8,0	0,309	7,0	8,3	NS**
		30-50	8,0	8,0	0,2	7,4	8,4	
CT (g 100 g ⁻¹)	78	0-30	6,22	5,68	2,84	1,26	15,3	NS**
		30-50	5,54	5,14	2,58	0,672	11,0	
CIT (g 100 g ⁻¹)	78	0-30	3,41	2,52	2,05	0,09	10,1	NS**
		30-50	3,65	3,13	1,39	0,056	10	
COT (g 100 g ⁻¹)	78	0-30	2,83	2,65	1,7	0,26	9,71	NS**
		30-50	1,93	1,86	1,5	0,00	7,49	
Nt (g 100 g ⁻¹)	78	0-30	0,239	0,205	0,18	1,074	1,01	S ⁺ S
		30-50	0,188	0,175	0,09	0,054	0,060	
C/N	78	0-30	11,7	11,9	12,2		57,1	NS**
		30-50	10,5	9,97	8,42		37,2	

* : $p < 0,05$ effet significatif (S) ; ** : $p > 0,05$ effet non significatif (NS) ; CT = COT+CIT ; E-t. : écart-type ; C/N = COT/N total.

Tableau 3 : Analyse de variance de l'effet des systèmes de culture sur la teneur moyenne en carbone organique total (COT, moyenne \pm écart type) (g 100g⁻¹).**Table 3:** Analysis of variance of the effect of cropping systems on the mean total organic carbon content (TOC, mean \pm standard deviation) (g 100g⁻¹).

	SI (n = 20)	SSI (n = 23)	SA (n = 24)	SSU (n = 11)
0-30	2,55 \pm 1,1 b	2,82 \pm 1,8 b	3,32 \pm 2,2 a	2,74 \pm 0,37 b
30-50	1,65 \pm 1,2 a	2,45 \pm 1,47 ab	2,32 \pm 1,7 ab	1,33 \pm 1,3 a
0-50	2,18 \pm 1,2 ab	2,70 \pm 1,7 b	2,96 \pm 2,1 b	2,25 \pm 0,7 ab

Les valeurs suivies d'une même lettre pour une même couche de sol indiquent qu'il n'existe pas de différence significative au seuil de 5%.

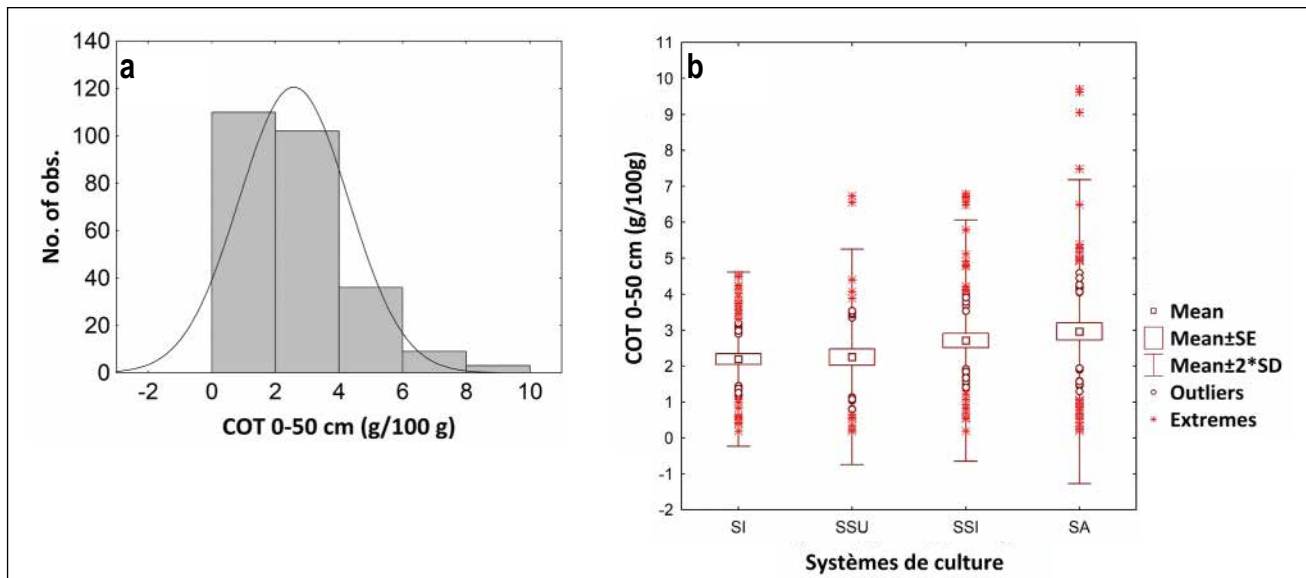
Variation de la teneur en carbone organique total (COT) en fonction des systèmes de culture et de la profondeur

Dans la couche 0-30 cm, la moyenne des concentrations en COT est de 2,83 gC 100 g⁻¹ (Tableau 2) avec des mesures comprises entre 2,55 (SI) et 3,32 gC 100 g⁻¹ (SA) (Tableau 3). Dans la couche 0-50 cm, la teneur moyenne en COT est de

2,57 gC 100 g⁻¹ et varie de 0 à 9,71 g 100 g⁻¹ (Figure 3). Les différences sont significatives entre les systèmes de culture, d'après le test de comparaison de Fisher LSD (Tableau 3) : pour la couche 0-30 SA > SI = SSI = SSU ; pour la couche 0-50 SI = SSU < SSI = SA. La distribution verticale des teneurs en COT est également marquée par des différences significatives entre la couche 0-30 et 30-50 cm.

Figure 3 : Concentrations en COT des couches 0-50 cm de sol, a) histogramme de distribution ; b) valeurs dans les quatre systèmes de culture.

Figure 3: TOC concentrations in the 0-50 cm layers, a) histogram; b) values in the four crops systems.



Stocks de carbone organique (COS) par type de sol

Le stock de COS dans la couche 0-50 cm a été calculé pour les 78 parcelles (Figure 4 et Tableau 4). La moyenne des stocks de COS des sols inventoriés est de $132 \pm 60,1$ MgC.ha⁻¹ variant de 31,9 MgC.ha⁻¹ à 346 MgC.ha⁻¹. Les types de sols [Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols (ici résumés par l'acronyme RELEC), Vertisols, Gleysols, Régosols, Leptosols et Haplic Cambisols] montrent des valeurs de stocks de COS très variées. Ainsi, pour la couche 0-30 cm, les RELEC présentent les valeurs les plus élevées, 119,4 MgC.ha⁻¹, suivis par les Vertisols (97,3 MgC.ha⁻¹), les Gleysols (78,9 MgC.ha⁻¹), les Régosols (59,0 MgC.ha⁻¹), les Leptosols (55,6 MgC.ha⁻¹), et enfin les Haplic Cambisols (38,3 MgC.ha⁻¹) (Tableau 4). Il faut noter que dans la vallée et une grande partie du plateau non irrigué dominées par les RELEC et les Vertisols, les sols soumis à l'agroforesterie ancienne sont systématiquement plus profonds.

Les stocks de COS selon la profondeur, les systèmes de culture et la topographie

Dans la couche 0-30 cm du sol, le stock moyen de carbone organique est de $97,5 \pm 45,7$ MgC.ha⁻¹ (Tableau 5). La population des valeurs mesurées varie de 87,43 MgC.ha⁻¹ (SSU) à 113,36 MgC.ha⁻¹ (SA). Dans la couche de sol 30-50 cm, les données sont comprises entre 24,02 MgC.ha⁻¹ et 42,4 MgC.ha⁻¹ avec un stock moyen de $35,4 \pm 18,5$ MgC.ha⁻¹. Des différences significatives ($p < 0,05$) sont observées entre les deux couches.

Au total, l'effet des systèmes de culture n'est statistiquement sensible que lorsque l'on considère la couche de sol 0-50 cm, avec les systèmes agroforestiers (SA) montrant un stock moyen plus élevé que SSU ($p = 0,011923$), faiblement plus élevé que SI ($p = 0,097536$) et non significativement différent de SSI. Les systèmes SI, SSI et SSU apparaissent similaires pour leurs valeurs de stocks en carbone organique.

Tenant compte de la position dans le paysage, le stock de COS 0-30 cm varie de 78,8 MgC.ha⁻¹ dans les versants à 105,41 MgC.ha⁻¹ pour les zones de plateaux.

4. DISCUSSION

Les sols de Saint-Raphaël présentent des ensembles de sols argilo-limoneux sur les plateaux et sablo-limoneux sur les versants (Tableau 2). Cette variabilité a été soulignée par Colmet-Daage *et al.* (1969). Les sols sont dérivés de lithologies carbonatées et présentent des valeurs de pH élevées. L'ensemble des observations, réaction calcique ou carbonatée, sur le terrain au test à l'acide sont confirmées par les mesures de teneurs de carbone inorganique dont la valeur moyenne est de 3,32 gC.100 g⁻¹ pour la couche 0-30 cm et de 2,57 gC.100 g⁻¹ pour la couche 0-50. Ainsi, certains sols présentent des valeurs de teneur en CaCO₃ importantes, supérieures à 0,8 g.g⁻¹ de sol en particulier dans les horizons les plus profonds (résultats non détaillés ici). Nous avons observé dans les sols peu épais des mesures de Da de 2,09 g cm⁻³ pour l'ensemble

de la couche considérée. Ce résultat peut résulter du fait que les masses volumiques de roches carbonatées sont comprises entre 2,0 et 2,8.

Les mesures de stocks organiques sont particulièrement dépendantes des mesures des Da des horizons de sols. Notre travail de terrain a fait appel à la mesure des Da par deux méthodes, ce qui peut être questionnable. Toutefois, il a fallu s'adapter au terrain et, lorsque la pierrosité dépasse un certain seuil, les mesures au cylindre deviennent impossibles à réaliser et/ou erronées. Dans ce cas, l'application de la méthode volumétrique à l'eau, dérivée de la méthode au sable décrite dans la norme ISO 11272 (2017), s'imposait. Les résultats des deux méthodes sont cohérents, ce qui est souligné par le test de comparaison des moyennes selon les systèmes de culture. Les Da pour l'ensemble des couches 0-50 cm ne présentent pas de différences significatives, cependant les valeurs de Da de la couche 0-30 cm montrent bien les valeurs en SI (1,39) et SSI (1,38) les plus élevées, bien que non significativement différentes des autres systèmes (SSU : 1,24 ; SA : 1,33) (Figure 2c). En l'absence d'éléments d'analyse particuliers, les valeurs inférieures de la population de SSU sont à relier à leur effectif limité (11 sites). S'agissant des valeurs les plus importantes, les parcelles SI et SSI occupent principalement des ensembles des sols (Vertisols et Gleysols), soumis à la compaction due au travail fréquent du sol et aux fréquences

d'irrigation qui ont un effet notable sur les valeurs de densité apparente (Van Wambeke, 1992).

Le calcul des stocks a été effectué en utilisant les Da mesurées dans et autour des fosses et les teneurs en COT des échantillons des composites des couches de sol. La limite de la mesure d'un stock sur un site vient du fait que nous présumons que ces mesures de Da localisées sont représentatives de la surface échantillonnée pour la mesure de COT. Nos surfaces d'échantillonnage étaient au plus d'un hectare par site. L'étendue de la plage des résultats des stocks 0-50 cm (Figure 4) indique une variabilité morphopédologique (Tableau 4), avec des coefficients de variation élevés. Une phase ultérieure de ce travail consistera à tester la variabilité spatiale des Da dans les unités taxonomiques des sols. Les limites actuelles de nos approches sont liées à la capacité de produire des mesures en nombre afin de modéliser les valeurs de Da caractéristiques des objets sols inventoriés.

La figure 5 présente des vues des paysages de la commune de Saint Raphaël et les valeurs moyennes des stocks organiques de la couche 0-50 cm des sols associées. Le tableau 6 présente quelques données de la région caribéenne sur des ensembles pédologiques et bioclimatiques comparables. Nous observons que les résultats obtenus à Saint-Raphaël corroborent avec ceux suggérés dans les caraïbes pour la couche de sol 0-30 cm. Par contre, les Gleysols présentent des stocks un peu plus

importants. En comparant nos résultats avec ceux issus des autres régions tropicales, les stocks moyens de Saint-Raphaël, compris entre 31,9 et 346 $\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ dans la couche 0-30 cm, sont en accord avec les résultats présentés à Madagascar (Grinand et al., 2009 ; stocks compris entre 1,2 et 198,8 $\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$) ou en Guyane Française (Courte et al., 2019 ; stocks compris entre 11 et plus de 275 $\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$). Ces résultats apportent de nouvelles précisions pour l'évaluation des stocks aux échelles régionales (Gardi et al., 2014) qui restent à documenter dans de nombreuses régions du bassin caribéen.

Cet inventaire montre une variabilité importante des stocks de COS. Elle reflète en partie les effets de la profondeur de sol considérée qui traduit la diversité des sols observés lors de cet inventaire (Tableaux 4 et 5). Les systèmes agroforestiers (SA) et du pâturage permanent (SSU), présentant respectivement les valeurs de stocks organiques les plus élevées et les plus

Figure 4 : Histogramme de distribution des stocks de carbone organique ($\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$) de la couche 0-50 cm des sols des 78 parcelles.

Figure 4: Histogram of the soil organic carbon stock distribution ($\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$) in the 0-50 cm layer of the soils in the 78 parcels.

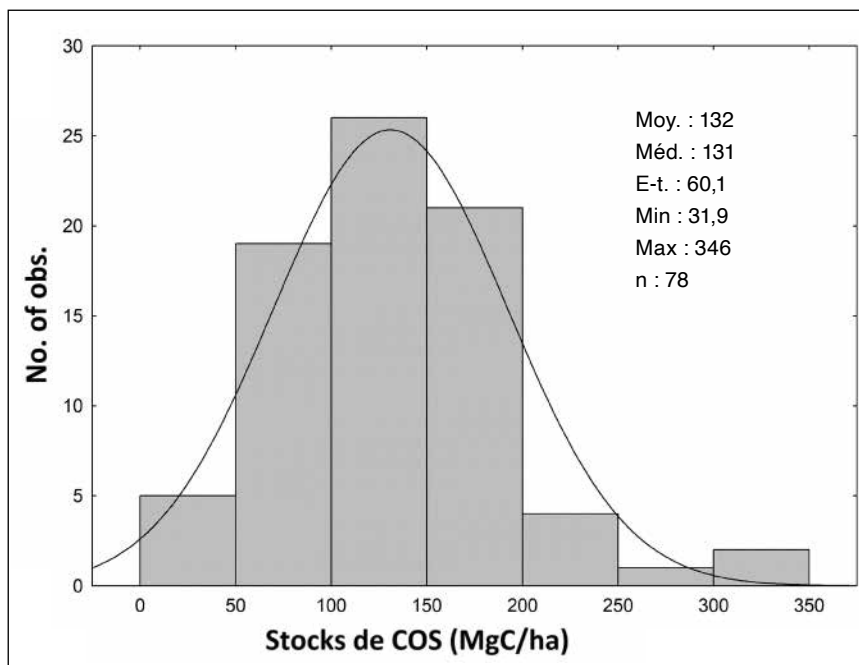


Tableau 4 : Analyse de variance de l'effet type de sol et de la profondeur sur le stock de carbone (COS, moyenne \pm écart type) en MgC ha⁻¹.**Table 4:** Analysis of variance of the soil type effect and depth on carbon stock (SOC, mean \pm standard deviation) in MgC ha⁻¹.

Sol	SC*	0-30 cm				30-50 cm				Effet profondeur
		N	Moy.	Min	Max	N	Moy.	Min	Max	
Leptosol	SSU/SSI	5	55,53 \pm 34 a	35,4	84,6	4	20,49 \pm 12,2 e	8,9	41,0	S
Régosol	SSU/SSI	10	59,01 \pm 59 a	30,5	108,3	7	37,9 \pm 26,4 f	0	92,4	S
RELEC**	SA/SSI	30	119,4 \pm 55,6 c	35,8	345,5	28	41,7 \pm 26,2 f	0	96,3	S
Vertisol	SI	20	97,27 \pm 46 b	18,2	207,1	15	26,1 \pm 25,9 e	0	73,0	S
Gleysol	SI	7	78,88 \pm 46 b	44,7	129,3	7	44,4 \pm 25,6 f	9,8	104,2	S
Haplic Cambisol	SSU	6	38,3 \pm 16,4 d	15,7	81,6	2	20,6 \pm 13,8 e	18,3	22,9	S

Les valeurs suivies d'une même lettre indiquent l'effet non significatif au seuil de 5% sur le stock de COS. SC* : Système de culture dominant ; n : nombre de profils pédologiques ; Moy. : Moyenne. RELEC** : Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols.

Tableau 5 : Variation des stocks de carbone organique (MgC.ha⁻¹) (COS, moyenne \pm écart type) en fonction des systèmes de culture, de la position des parcelles dans le paysage et de la profondeur.**Table 5:** Soil organic stocks (MgC.ha⁻¹) (SOC, mean \pm standard deviation) variation as a function of cropping systems, site position in the landscape and depth.

Données globales					Effet profondeur
Couche (cm)	Moy.	Méd.	Min.	Max.	
0-30	97,5 \pm 45,7 a	88,1	31,9	346	S
30-50	35,4 \pm 18,5 b	36,2	1,34	104,23	
0-50	132,7 \pm 60,1	131	31,9	346	
Système de culture					S
Couche (cm)	SI (n = 20) Moy.	SSI (n = 23) Moy.	SA (n = 24) Moy.	SSU (n = 11) Moy.	
0-30	87,54 \pm 26,2 a	93,9 \pm 41,3 a	113,3 \pm 59,3 a	87,43 \pm 41,2 a	
30-50	33,8 \pm 17,4 b	38,6 \pm 20,1 b	42,4 \pm 19,4 b	24,02 \pm 12,7 b	
0-50	121,3 \pm 48,5 c	132,5 \pm 53 c	155,8 \pm 67,9 ac	111,45 \pm 44,6 c	
Position dans le paysage					S
Couche (cm)	Plateau Moy.	Pente/Versant Moy.	Vallée Moy.		
0-30	105,4 \pm 42,1 a	78,8 \pm 34 b	102,02 \pm 31 a		
30-50	34,03 \pm 16 ab	33,20 \pm 13 ab	48,13 \pm 14 b		
0-50	139,4 \pm 48,8 c	112 \pm 37 ac	150,15 \pm 40 c		

Les valeurs suivies d'une même lettre indiquent l'effet non significatif au seuil de 5% en termes de profondeur, de position des parcelles dans le paysage et des systèmes de culture.

faibles, sont considérés comme déterminants de cette variabilité à 0-50 cm. Cependant, Il convient toutefois de souligner l'effet non significatif des stocks organiques dans l'horizon de surface (0-30 cm) entre les systèmes de culture (*Tableau 5*). Un effet du type de sol, de la profondeur du sol et de la topographie sur l'expression des stocks est constaté également (*Tableau 3*; *Tableau 4*). S'agissant des Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols (regroupés ici en RELEC), la gamme des valeurs de stocks 0-30 cm de la population issue des 30 sites est très large (*Tableau 4*). La moyenne est centrée sur 15 mesures entre 100 et 150 MgC. ha⁻¹, puis 7 mesures supérieures à 150, les autres étant inférieures à 100 MgC. Ces résultats sont obtenus sur des sols situés sur les zones les plus en pente, mais aussi pour des parcelles sur des replats et bas de pente avec des sols plus épais que les rendzines et qui stockent bien plus de carbone. Une partie de ces sols se situe sous des systèmes agroforestiers des bas de versants. Il s'avère qu'il y a dans ces sols des densités racinaires importantes observées lors des prélèvements.

Les stocks organiques les plus faibles sont observés dans les Haplic Cambisols, mais aussi dans une moindre mesure dans les Régosols et des Leptosols des versants qui correspondent essentiellement au système SSU (*Tableau 4*; *Figure 6*). Ces résultats corroborent ceux observés par Barreteau et al. (2004) indiquant que les stocks organiques les plus faibles en Martinique ont été enregistrés sous prairies de recrus de friches. Ce sont les mêmes observations faites dans la région du Sud d'Haïti (Feller et al., 2006).

Les valeurs élevées de stock organique observées, en accord avec des travaux antérieurs (Feller et al., 1990; Jobbágy et Jackson, 2000; Balesdent et al., 2000; Fujisaki et al., 2018), sont également à mettre en relation avec les teneurs élevées en éléments fins favorisant le stockage des composés organiques. Razafimbelo et al. (2010) ont indiqué que l'abondance en argile dans le sol favorise la formation de composés organo-minéraux chimiquement stables qui, selon Heywood et Turpin (2013), protègent physiquement la MOS des activités bactériennes. Feller et Chenu (2012) ont indiqué que cette protection physique provoque une diminution de la biodégradabilité des matières organiques du fait de leur localisation au sein des agrégats bio-organominéraux (Balesdent et al., 2000). En conséquence, plus la proportion de carbone organique associée aux particules fines est élevée, plus le stock de carbone serait considéré comme stable (Barré et al., 2020). C'est le cas des SI et SSI où les concentrations en COS paraissent stables malgré les travaux aratoires du sol importants en SI. À ce stade, nous n'avons pas encore effectué de caractérisation fine de la distribution du carbone organique selon les fractions granulométriques des sols. Toutefois, la nature de la fraction argileuse est sans doute dominée par des minéraux 2/1 comme les ont précédemment caractérisés Colmet-Daage et al. (1969). Ils ont souligné que les sols calcimorphes sur des formations calcaires

et des climats proches de notre étude, des Rendzines aux Vertisols, présentaient une fraction argileuse essentiellement montmorillonitique. Les résultats rapportés par Feller et al. (2006) (*Tableau 5*) sont dans la plage des mesures à St Raphaël indiquant respectivement des stocks moyens de 97,27 MgC. ha⁻¹ et 119,45 MgC. ha⁻¹ dans les Vertisols et les RELEC. Le rôle de la fraction argileuse a été souligné dans la protection du carbone à la minéralisation dans les macroagrégats (Chevallier et al., 2004). C'est ainsi que les travaux en Martinique (Barreteau et al., 2004) ont montré une corrélation positive entre stock organique et la teneur en argile en mentionnant que les potentialités de stockage de carbone sont nettement plus élevées pour les sols argileux comme les Vertisols.

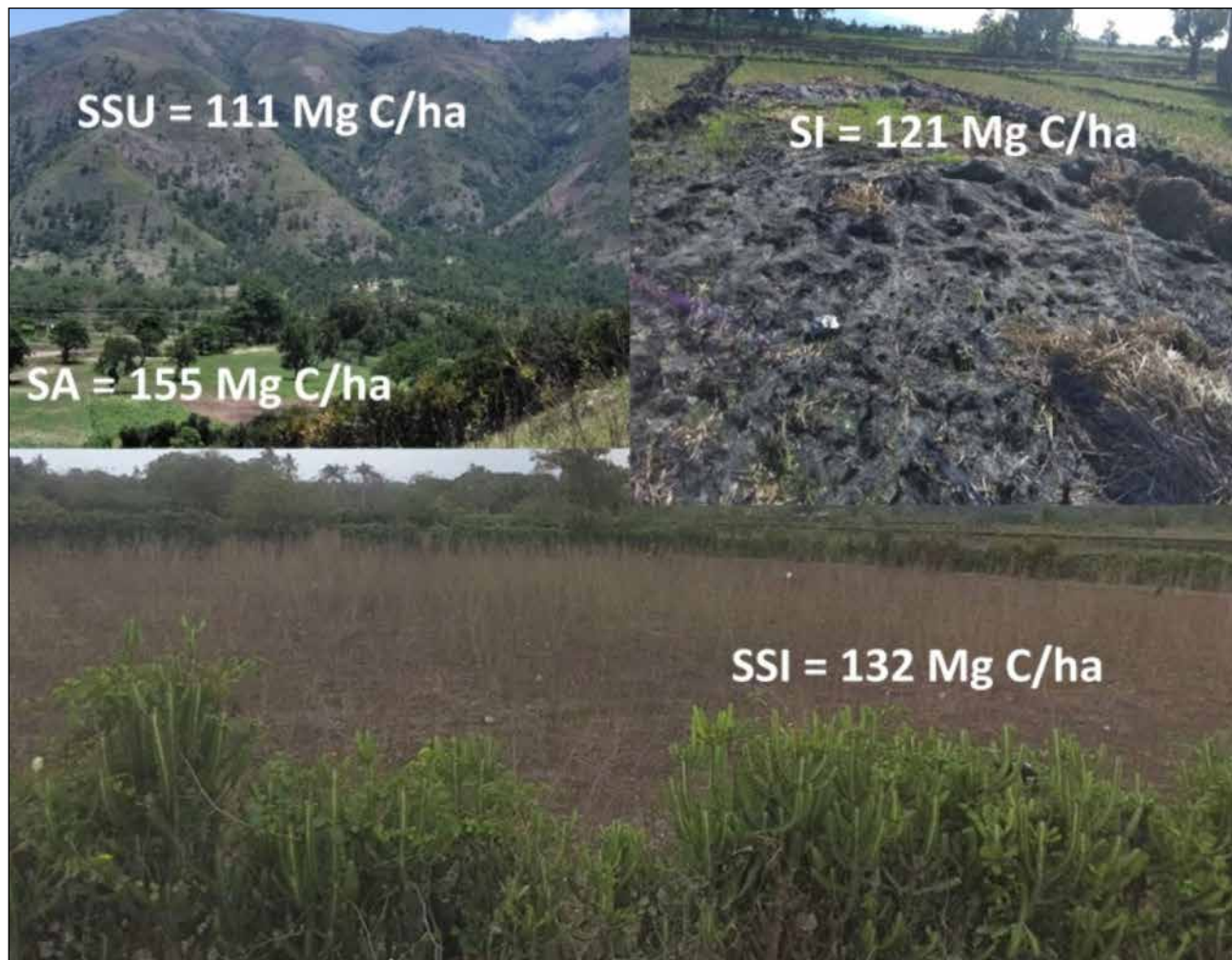
Le rôle des carbonates dans la stabilisation et la protection des matières organiques reste posé dans ce contexte haïtien. L'importance des carbonates de calcium et de magnésium dans la stabilisation des matières organiques a été soulignée (Fernández-Ugalde et al., 2014; Garcia-Franco et al., 2021; Zamanian et al., 2021). Nous avons noté à Saint-Raphaël de fortes teneurs en CIT qui s'observent en SA suivant une variation de 2,61 g 100 g⁻¹ en situations de versants (SSU) à 4,15 g 100 g⁻¹ en situations de vallée (SA). L'entraînement des particules fines du sol par érosion des pentes peut éventuellement être mise en cause dans le système SSU. Toutefois, s'agissant des sols en bas de versants, Velasco et al. (2018) ont mesuré au sud d'Haïti, à l'aide de l'outil ¹³⁷Cs, des taux de déposition de sédiments variant de 6,0 à 71 t ha⁻¹ an⁻¹, alors que les taux d'érosion 23 t ha⁻¹ an⁻¹ sont assez limités dans les hauts de versants comparés à d'autres régions du monde (par exemple au Brésil, Leprun, 1994). Il est probable que la nature carbonatée ou calcique de la fraction fine des sols de St-Raphaël amenuise considérablement le potentiel d'érodibilité des sites inventoriés, ce qui est attesté par les valeurs de stocks élevées des sites sur les versants (*Tableau 5*). Toutefois, il convient d'être attentif à la distribution de ces stocks qui montrent des valeurs basses pour certains types de sols de pente (*Tableau 4*).

Nous avons souligné les valeurs des stocks du système SA (*Tableau 5*). Dans le contexte caribéen, il est actuellement difficile de trouver des points de comparaison avec des contextes pédologiques et bioclimatiques semblables. Sur cinq sites agroforestiers inventoriés par IDIAF (2010) en République Dominicaine, sans que des données soient fournies pour les calculs des stocks, la teneur en COT dans la couche 0-17 cm variait de 2,5 à 9,88 gC. 100 g⁻¹ avec une moyenne de 4,86 gC. 100 g⁻¹. Ces résultats paraissent comparables à ceux inventoriés à St Raphaël, où le SA indique en moyenne 3,32 gC. 100 g⁻¹ (*Tableau 3*) dans la couche 0-30 cm. Nous constatons que les pratiques agroforestières (SA) attribuées, selon Courte et al. (2020), aux pratiques à faible impact, sont acceptables en matière de stockage de COS. Elles peuvent être considérées comme des modèles de pratiques à promouvoir pour une amélioration de la productivité des terres et de la sécurité

Tableau 6 : Valeurs de stock de carbone organique ($\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$) de sols de la région caribéenne.**Table 6**: Soil organic carbon stocks values ($\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$) of soils in the Caribbean region.

Région	Types de sols	Stocks	Couche	Auteur
Haïti (Sud)	Vertisols	75	0-30	Feller <i>et al.</i> (2006)
Haïti (Sud)	RELEC*	130-230	0-30	Feller <i>et al.</i> (2006)
Haïti	Ferralsol et Vertisols	76-100	0-30	Gardi <i>et al.</i> (2014)
Les Antilles	Ferralsol et Vertisols	60	0-30	Gardi <i>et al.</i> (2014)
Les Antilles	Cambissols	80	0-30	Gardiet <i>et al.</i> (2014)
Martinique	Vertisols	90-110	0-30	Barreteau <i>et al.</i> (2004)
Les Antilles	Gleysols	75	0-30	Gardi <i>et al.</i> (2014)

RELEC* : Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols

Figure 5 : Les systèmes de culture dans la morphologie du paysage et valeurs moyennes des stocks de carbone organique associés (couche 0-50 cm) à Saint-Raphaël.**Figure 5**: The cropping systems in the landscape morphology and the associated mean soil organic carbon stocks (layer 0-50 cm) in Saint Raphaël.

alimentaire en Haïti. Elles constituent les pratiques qui restituent le mieux la MOS en raison d'une meilleure couverture végétale, d'une augmentation des inputs de carbone par les arbres, et d'une meilleure colonisation racinaire dans les 50 premiers centimètres du sol.

5. CONCLUSION

Cette étude a fourni une première estimation du stock de carbone organique des sols jusqu'à 50 cm de profondeur dans le cadre d'un inventaire d'une série de systèmes de culture. Cet inventaire est une première phase pour construire un référentiel de stock de COS. Cette étude indique une variabilité importante des stocks de carbone organique selon le type de sol, la profondeur de sol explorée, la position dans le paysage et les systèmes de culture. Le système agroforestier présente les stocks les plus importants pour la couche de sol 0-50 cm. La couche 0-30 cm a représenté 65 % de la valeur totale des stocks mesurés jusqu'à 50 cm de profondeur. Il n'est pas observé d'écarts significatifs entre les valeurs de stocks des autres systèmes. Les stocks les plus bas, mais encore avec une assez large diversité, sont observés dans les Haplic Cambisols, les Leptosols et les Régosols sur les versants. Sur le plan topographique, cette variabilité de stocks de COS constatée en micro zone agroécologique de montagne peut être expliquée suivant deux situations couramment rencontrées à Saint-Raphaël, des versants érodés et des versants relativement boisés de type mésophiles. Enfin, d'autres recherches devraient prendre en compte les couches plus profondes des sols les plus épais et la distribution des matières organiques dans les fractions granulométriques du sol. Un axe devra s'intéresser à la relation de celles-ci avec les carbonates. D'autres inventaires doivent être poursuivis afin de mieux prendre en compte la diversité pédologique et les pratiques d'usages des sols en Haïti.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement les deux relecteurs ainsi que Dominique Arrouays pour leurs critiques constructives. Nos remerciements vont également au Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural, qui a financé cette étude, ainsi qu'aux organismes et aux collègues impliqués dans le comité de pilotage : Agrisud International, Groupe de Recherche et d'Action pour le Développement Intégré du Milieu Rural Haïtien, Campus Henry Christophe de Limonade, IRD (Convention n° 308141- 00).

BIBLIOGRAPHIE

- Albrecht A., Brossard M., Chotte J.-L., Feller C. (1992). Les stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique (Petites Antilles). Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVII, n° 1, pp. 23-36.
- Balesdent J., Chenu C., Balabane M. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil & Tillage Research*, 53, pp. 215-230.
- Barré P., Cecillon L., Chenu C., Martin M., Vidal-Beaudet L., Eglin T. (2020). La séquestration de carbone dans les sols agricoles, forestiers et urbains : état des lieux des méthodes d'évaluation et de quantification. *Étude et Gestion des Sols*, 27, pp. 305-320.
- Barreault D., Blanchart E., Saudubray F., Bernoux M., VIODÉ J.-P. (2004). Les stocks de carbone dans les sols des Antilles. Importance agronomique et environnementale. *Les cahiers du PRAM.*, 4 : 43 p.
- Betemariam E.A., Vagen T.G., Shephard K.D., Winowiecki L. (2011). A Protocol for Measuring and Monitoring Soil Carbon Stocks in Agricultural Landscapes. *World Agroforestry Centre (ICRAF)*, 19 p.
- BME (2005). Notice explicative de la carte géologique d'Haïti au 1/250 000^{ème}. Bureau des Mines et de l'Énergie. www.bme.gouv.ht
- Calvaruso C., Blanchart A., Bertin S., Grand C., Pierart A., Eglin T. (2020). Quels paramètres du sol mesurer pour évaluer les fonctions et les services écosystémiques associés ? *Revue de la littérature et sélection de paramètres en ateliers participatifs*, *Étude et Gestion des Sols*, 28, pp. 3-29.
- CHCL, Agrisud International, GRADIMIRH, IRD. 2020. Rapport de microzonage agro écologique de Saint-Raphaël, Haïti. Consortium CHCL, Agrisud International, GRADIMIRH, CHCL. Livrable 3 dédié au Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural (MARNDP), Port-au-Prince, Haïti. <https://agriculture.gouv.ht>, 60 p.
- Chenu C., Klumpp K., Bispo A., Angers D., Colnenne C. (2014). Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations Agronomiques*, INRAE, 2014, 37, pp. 23-37. [ffhal-0117319f](https://doi.org/10.117319f).
- Chenu C., Chotte J.-L., Luu P. (2022). Le stockage du carbone dans les sols, Responsabilité et Environnement. DOI: 10.3917/re1.105.0072, pp. 72-77.
- 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 and Environment*, 103, 2. pp. 375-387.
- Chevallier T., Razafimbelo T.M., Chapuis-Lardy L., Brossard M. (2020). Carbone des sols en Afrique / Impact des usages des sols et des pratiques agricoles. *FAO/IRD*, pp. 137-155. DOI: 10.4060/cb0403fr.
- Colmet-Daage F., Delaune M., Robbart F., Lohier G., Youance J., Gautheyrou J., Gautheyrou M., Fusil G., Koukoui M. (1969). Caractéristiques et nature de la fraction argileuse de quelques sols rouges d'Haïti situés sur calcaires durs. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 7, 3, pp. 345-415.
- Courte A., Cialdella N., Muller A., Blanfort V., Bochu J.L., Brossard M. (2019). Recenser et évaluer les pratiques agricoles qui stockent le carbone des sols, premier pas vers une agriculture à faible impact en Guyane. *Cahiers Agricultures*, 29. <https://doi.org/10.1051/cagri/2020019>. 9 p.
- Derrien D., Dignac M.F., Basile-Doelsch I., Barot S., Cécillon L., Chenu C., Chevallier T., Freschet G., Garnier P., Guenet B., Hedde M., Klumpp K., Lashermes G., Maron P.-A., Nunan N., Roumet C., Barré P. (2016). Stocker du C dans les sols : Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs. *Étude et Gestion des Sols*, 23, pp 193-223. [fdi:010070578](https://doi.org/10.10070578).
- Dolisca F., McDaniel J., Teeter L., Jolly C. (2007). Land tenure, population pressure, and deforestation in Haiti: the case of Forêt des Pins Reserve. *Journal of Forest Economics* 13 (4), 277289. DOI: 10.1016/j.jfe.2007.02.006.

- Dorvil W., Clermont-Dauphin C., Chotte J.L., Brossard M., Théodat J.M., Museau H. (2023). Jachère, légumineuses, agroforesterie et labour : les déterminants de la diversité des systèmes de culture à Saint-Raphaël. *International Journal of Biological and Chemical Sciences.*, 17 (4): 1643-16619404-IJBCS.
- Dulorme M., Sierra, J., Sophie S.A., Solvar F. (2000). Capacidad de secuestro del carbono y del nitrógeno en un sistema agroforestal a base de *Gliricidia sepium* en clima tropical sub-húmedo (Guadalupe, Antillas Francesas). Conferencia electrónica para la producción animal en América Latina, 1999, Italia. 4 p. HYPERLINK «<https://hal.inrae.fr/hal-02841706>» \t «_blank» hal-02841706.
- Eglin T., Cousin I., Walter C. (2021). Contribution aux réflexions sur les concepts de fonctions des sols et de services écosystémiques, et leur évaluation. *Étude et Gestion des sols*, 28, pp. 143-146.
- FAO. (2017). Carbone Organique du Sol: une richesse invisible. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie.
- FAO et ITPS. (2015). État des ressources en sols du monde - Résumé technique Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et Groupe technique intergouvernemental sur les sols, Rome, Italie.
- Feller C., Albrecht A., Brossard M., Chotte J.-L., Cadet P., Hétier J.-M., Barrois I., Mariotti A., Castellane C., De Guiran E., Clairon M., Daly P., Mahieu M., Pilgrim M., Ramdass A., Ahmad M., Griffith S.M., Fardeau J.-C. (1990). Effets de différents systèmes de culture paysans sur quelques propriétés des sols et relations sol-plante dans la zone des Petites Antilles. *SACAD: 163-190*. FDI: 010021549.
- Feller C., Clermont-Dauphin C., Venkatapen C., Albrecht A., Arrouays D., Bernoux M. et al. (2006). Carbon Sequestration in Soils of Latin America, The Haworth Press, doi:10.1300/5755_10. pp. 187-211.
- Feller C., Chenu C. (2012). Les interactions bio-organo-argileuses et la stabilisation du carbone dans le sol. *Étude et Gestion des Sols*, 19, pp. 235-248.
- Fernández-Ugalde O., Virto I., Barré P., Apesteguía M., Enrique A., Imaz M.J., Bescansa P. (2014). Mechanisms of macroaggregate stabilisation by carbonates: implications for organic matter protection in semi-arid calcareous soils. *Soil Research* 52, 180-192.
- Fujisaki K., Chevallier T., Chapuis-Lardy L., Albrecht A., Razafimbelo T., Masse D., Badiane Ndour Y., Chotte J.L. (2018). Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 259 (2018): 147-158. DOI: 10.1016/j.agee.2017.12.008.
- García-Franco N., Walter R., Wiesmeier M., Hurtarte L.C.C., Berauer B.J., Buness V., Zistl-Schlingmann M., Kiese R., Dannenmann M., Kögel-Knabner I. (2021). Biotic and abiotic controls on carbon storage in aggregates in calcareous alpine and prealpine grassland soils. *Biology and Fertility of Soils.*, 57:203–218. DOI: 10.1007/s00374-020-01518-0.
- Gardi C., Angelini M., Barceló S., Comerma J., Cruz Gaistardo C., Encina Rojas A., Jones A., Krasilnikov P., Mendonça Santos Brefin M.L., Montanarella L., Muñoz Ugarte O., Schad P., Vara Rodríguez M.I., Vargas R. (2014). Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg, 176 pp.
- GIEC (2006). Guidelines for national greenhouse gas inventories. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Volume 4 Agriculture, forestry and other land use. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.
- Grinand C., Rajaonarivo A., Bernoux M., Pajot V., Brossard M., Razafimbelo T., Albrecht A., Le Martret H. (2009). Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Étude de Gestion des sols*, 16, pp. 23-33.
- Heywood P., Turpin S. (2013). Variation in soil carbon stocks with texture and previous land use in north-western NSW, Australia. *Sustainable Agriculture Research*, 2, pp. 124-133.
- Hilbe J.M. (2007). *STATISTICA 7*. The American Statistician., 61(1): 91-94 DOI: 10.1198/000313007X172998.
- Houssoukpèvi I.A., Aholoukpè H.N.S., Fassinou D.J.M., Rakotondrazafy M.N., Amadji G.L., Chapuis-Lardy L., Chevallier T. (2022). Biomass and soil carbon stocks of the main land use of the Allada Plateau (Southern Benin). Taylor & Francis Group, 13 (1), 249–265. DOI: 10.1080/17583004.2022.2074314.
- IDIAF, Instituto Dominicano de investigaciones Agropecuarias y Forestales. (2010). Caracterización de suelos en zonas cafetaleras de la República Dominicana: Resultados de Investigación. IDIAF. Santo Domingo, DO. 125 p.
- ISO 10390 (2021). Soil, treated biowaste and sludge – Determination of pH.
- ISO 10693 (1998). Soil quality - Determination of carbonate content – Volumetric method.
- ISO 13878 (1998). Qualité du sol – Détermination de la teneur totale en azote par combustion sèche («analyse élémentaire»)
- ISO 10694 (1995). Soil quality - Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis).
- ISO 13878 (1998). Soil quality - Determination of total nitrogen content by dry combustion ("elemental analysis").
- ISO 23400 (2021). Guidelines for the determination of organic carbon and nitrogen stocks and their variations in mineral soils at field scale.
- ISO 11272 (2017). Soil quality — Determination of dry bulk density.
- IUSS Working Group WRB (2014). World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Jobbágy E.G., Jackson R.B. (2000). The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation. *Ecological Society of America*, <http://dx.doi.org/10.1890/10>, pp. 423-436.
- Kätterer T., Bolinder M. A., Andrén O., Kirchmann H., Menichetti L. (2011). Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141. DOI: 10.1016/j.agee.2011.02.029, pp. 184-192.
- Lal R. (2020). Soil organic matter content and crop yield, HYPERLINK «<https://www.researchgate.net/journal/Journal-of-Soil-and-Water-Conservation-1941-3300>» *Journal of Soil and Water Conservation*, 75, DOI:10.2489/jswc.75.2.27A, pp. 27-32.
- Le Quéré C., Andrew R.M., Friedlingstein P., Sitch S., Hauck J., Pongratz J., Pickers P.A., Korsbakken J.I., Peters G.P., Canadell J.G., Arnett A., Arora V.K., Barbero L., Bastos A., Bopp L., Chevallier F., Chini L.P., Ciais P., Doney S.C., Gkritzalis T., Goll D.S., Harris I., Haverd V., Hoffman F.M., Hoppema M., Zheng B. (2018). Global carbon budget. *Earth Syst. Sci. Data*, 10. DOI: 10.5194/essd-10-2141-2018, pp. 2141-2194.
- Leprun J.-C. (1994). Effets de la mise en valeur sur la dégradation physique des sols: bilan du ruissellement et de l'érosion de quelques grands écosystèmes brésiliens. *Étude et Gestion des Sols*, 1, 1, pp. 45-65.
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.-S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke S., Richer-de-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui C.-C., Vågen T.-G., Van Wesemael B., Winowiecki L. (2017). Soil carbon 4 per mille. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002, pp. 59-86.
- Peel M. C., Finlayson B.L., McMahon T.A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644.

- Ramesh T., Hazarika S., Choudhury B.U., Das A., Balusamy A., Krishnappa R., Joymati Chanu L., Ngachan S.V. (2019). Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review, DOI: 10.1016/bs.agron.2019.02.001, 107 p.
- Razafimbelo T., Albrecht A., Feller C., Ravelojaona H., Moussa N., Razanamparany C. Rakotoarinivo C., Razafintsalama H., Michellon R., Naudin K., Rabeharisoa L. (2010). Stockage de carbone dans les sols sous-systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV) dans différents contextes pédoclimatiques à Madagascar, *Étude et Gestion des Sols*, 17, pp. 143 à 158.
- Velasco H., Torres Astorga R., Joseph D., Antoine J.S., Mabitd L., Tolozad A., Dercond G., Walling des E. (2018). Adapting the Caesium-137 technique to document soil redistribution rates associated with traditional cultivation practices in Haiti. *Journal of Environmental Radioactivity*, 183: pp. 7-16. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.12.008.
- Van Wambeke A. (1992). *Soils of the Tropics: Properties and appraisal*. McGraw-Hill, London.
- Zamanian K., Zhou J., Kuzyakov Y. (2021). Soil carbonates: The unaccounted, irrecoverable carbon source. *Geoderma* 384. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114817.