



**Original Paper**

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

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

## Le statut organique des sols à Saint-Raphaël : quels mécanismes, quelles pratiques agricoles et quels indicateurs ?

Weldenson DORVIL<sup>1,2\*</sup>, Herauld MUSEAU<sup>1</sup>, Waselin SALOMON<sup>1</sup>, Donald ANDRÉ<sup>1</sup> et Jean-Marie THÉODAT<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université d'État d'Haïti, Campus Henry Christophe de Limonade. 1130, Rte Nationale # 6 Limonade, Haïti.

<sup>2</sup> IRD Eco&Sols, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France.

<sup>3</sup> Université d'État d'Haïti, Faculté des sciences, URBAter, URBALaB, Angle Rues Joseph et Mgr Guilloux, Port-au-Prince, Ouest, Haïti.

\*Auteur correspondant ; E-mail : [dorwely04@yahoo.fr](mailto:dorwely04@yahoo.fr), [weldenson.dorvil@supagro.fr](mailto:weldenson.dorvil@supagro.fr) ; Tel. : +33667783620, +50936099793

Received: 07-08-2023

Accepted: 04-10-2023

Published: 31-10-2023

### RÉSUMÉ

Le changement climatique menace au plus haut niveau la sécurité alimentaire de par son fort impact sur l'agriculture. Cependant le stockage et la séquestration du carbone organique dans le sol permettent d'atténuer ces problèmes tout en offrant une partie de la solution au réchauffement climatique. Cette étude suggère une seconde caractérisation du statut organique des sols jusqu'à 100 cm de profondeur en Haïti. Nos résultats ont montré une grande variabilité verticale des concentrations de carbone et d'azote total. Suivant une approche de mesure directe sur 90 parcelles, nos analyses statistiques ont montré une forte concentration en carbone organique total dans les 10 premiers centimètres du sol (3,7 g 100 g<sup>-1</sup>). Il en est de même pour la concentration en azote totale avoisinant 0,275 g kg<sup>-1</sup>. Dans la couche 50-100 cm, des faibles teneurs en carbone et en azote estimées respectivement à 1,125 g 100 g<sup>-1</sup> et à 0,025 g kg<sup>-1</sup> ont été repérées. La variabilité des stocks organiques a été également constatée au niveau des types de sol, de la topographie et des systèmes de culture. Ainsi, les plus élevés et les plus faibles stocks de carbone organique ont été enregistrés respectivement dans le système agroforestier (196,44 MgC. ha<sup>-1</sup>) et le système de pâturage (128,55 MgC. ha<sup>-1</sup>). Les stocks de carbone organique varient de 80,57 MgC. ha<sup>-1</sup> pour les Haplic Cambisols positionnés dans les versants à 203 MgC. ha<sup>-1</sup> pour les Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols (RELEC) qui sont majoritairement situés dans la vallée. L'effet significatif au seuil de 5% a été observé entre les systèmes de culture et les types de sol. Ces résultats indiquent que la restauration des sols requiert des apports de matières organiques exogènes et endogènes par l'implémentation des pratiques agricoles résilientes. Ils ont aussi permis d'établir le lien entre la fertilité des sols et la restitution de la matière organique en vue d'une amélioration de la sécurité alimentaire. Il a été ainsi crucial d'identifier les systèmes de culture et les pratiques agricoles répondant au mieux au stockage de carbone et d'azote total.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

**Mots clés :** Changement d'usage des terres, Carbone organique total, Densité apparente, Azote total, Types de sol, Profondeur du sol, Topographie, Érosion.

## Soil organic status in Saint-Raphael: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies

### ABSTRACT

Climate change poses a major threat to food security, due to its strong impact on agriculture. However, the storage and sequestration of organic carbon can mitigate these problems and offer part of the solution to global warming. This study suggests a second characterization of the organic status of soils up to 100 cm soil depth in Haiti. Our results showed a large vertical variability of carbon and total nitrogen concentrations. Following a direct measurement approach on 90 plots, our statistical analyzes showed a high concentration of total organic carbon in the first 10 centimeters of the soil ( $3.7 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ ). It is the same for the concentration of total nitrogen around  $0.275 \text{ g kg}^{-1}$ . In the 50-100 cm layer, low carbon and nitrogen contents estimated respectively at  $1.125 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$  and at  $0.025 \text{ g kg}^{-1}$  have been spotted. The variability of organic stocks has also been observed at the level of soil types, topography and cropping systems. Thus, the highest and lowest of organic carbon stocks were recorded respectively in the agroforestry system ( $196.44 \text{ MgC ha}^{-1}$ ) and the grazing system ( $128.55 \text{ MgC ha}^{-1}$ ). Organic carbon stocks vary from  $80.57 \text{ MgC ha}^{-1}$  for the Haplic Cambisols positioned in the slopes at  $203 \text{ MgC ha}^{-1}$  for Rendzic Leptosols and Epileptics Cambisols (RELEC) which are mostly located in the valley. The significant effect at the threshold of 5% was observed between the cultivation systems and the soil types. These results indicate that soil restoration requires inputs of exogenous and endogenous organic matter through the implementation of resilient agricultural practices. They have also made it possible to establish the link between soil fertility and the return of organic matter in order to improve food security. It was thus crucial to identify the cropping systems and agricultural practices that best respond to total carbon and nitrogen storage. © 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

**Keywords:** Land use change, Total organic carbon, Bulk density, Total nitrogen, Soil types, Soil depth, Topography, Erosion.

### INTRODUCTION

Les émissions atmosphériques de carbone des agroécosystèmes et l'augmentation des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre dues à la déforestation et aux autres activités anthropiques sont les principales causes du réchauffement climatique (GIEC, 2007 ; Li et al., 2021). Les concentrations actuelles de  $\text{CO}_2$  augmentent considérablement par rapport à la période préindustrielle passant de 277 parties par millions (ppm) en 1750 à  $405 \pm 0,1$  ppm en 2017 (Dlugokencky et Tans, 2018) et atteignent de nos jours 420 ppm (NOAA, 2023). L'augmentation de la température globale mondiale qui en découle menace le climat et les habitats naturels de la planète (IPCC, 2014 ; IPCC, 2021). Les écosystèmes terrestres, réservoirs mondiaux de carbone et support de la végétation et de la production agricole, sont directement liés aux changements globaux en particulier, aux enjeux de la sécurité alimentaire et du changement climatique (Fujisaki et al., 2018).

Les stocks mondiaux de carbone organique des sols (COS), estimés à environ 1 500 Gt pour le premier mètre du sol, sont l'indicateur de la santé et de la fertilité du sol (Courte et al., 2020). Ils contribuent à la production alimentaire, à la réduction et à l'adaptation au changement climatique et à la réalisation des Objectifs pour le Développement Durable (ODD) (FAO, 2017). Ils améliorent la stabilité structurelle du sol, fournissent les nutriments aux plantes et améliorent la disponibilité de l'eau (Annabi et al., 2005 ; Grosbellet, 2008 ; Some et al., 2015 ; Chen et al. 2022).

De nombreuses stratégies ont été identifiées pour augmenter le stock de COS en fonction du type de sol et du climat : le contrôle de l'érosion (FAO, 2017), le maintien d'une couverture du sol (Chen et al., 2014 ; Pellerin et al., 2021), l'augmentation de la production primaire (Chevallier et al., 2015 ; Chen et al. 2022). De leur côté, Rasse et al. (2005) et Katterer et al. (2011) ont suggéré la forte contribution des racines.

Aussi une gestion raisonnée des agroécosystèmes doit-elle viser à réduire les émissions des gaz à effet de serre et/ou à augmenter leur séquestration dans le système sol-plante. Parmi les alternatives de gestion permettant de stocker du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans le système sol-plante, de nombreuses pratiques mettant en relation les propriétés du sol et le mode d'usage sont jugées très prometteuses. Il s'agit par exemples, des pratiques de non-labour, l'agroforesterie, les prairies temporaires et surtout permanentes, etc. Ces pratiques, associées à des systèmes de culture impliquant des couvertures végétales, paraissent intéressantes tant pour les milieux tempérés (Balesdent et al., 1999 ; Halvorson et al., 2002 ; Six et al., 2002 ; Barré et al., 2020 ; Pellerin et al., 2021) que tropicaux (Six et al., 2002 ; Nair et al., 2009a ; Feller et al., 2006 ; Fujisaki et al., 2018, Courte et al., 2020).

Les agroécosystèmes haïtiens n'ont encore fait l'objet d'aucune étude susceptible d'aider à appréhender le lien entre le statut organique des sols et la production agricole. Or, les progrès sur la connaissance de la matière organique et sa dynamique dans les sols sont nécessaires pour mieux gérer la séquestration du carbone. Ce travail est intéressant pour une meilleure compréhension du lien entre la fertilité des sols et le stockage de carbone et d'azote total des différents systèmes de culture à Saint-Raphaël. Aussi la demande de références scientifiques, quasiment inexistantes, de la part des utilisateurs sur le terrain est forte.

Le travail de cet article se centrera sur la problématique suivante : Existe-t-il un lien entre le statut organique des sols et la production agricole durable à Saint-Raphaël ? Pour répondre à cet enjeu, nous fixons l'hypothèse que les concentrations en carbone organique et d'azote total sont directement liées aux mécanismes biotiques et abiotiques. Cette étude vise d'une part à mieux décrire la distribution verticale du carbone et d'azote dans les horizons profonds et d'autre part, à analyser l'effet de cette distribution sur la production agricole durable dans les différents

systèmes de culture et les différents types de sols inventoriés dans la zone.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Zone d'étude

L'étude a été réalisée entre mars 2020 et juillet 2023 à Saint-Raphaël (19°17'51,02 N, 72°04'15,17 O), Commune du Nord d'Haïti (Figure 1a). Le climat, de type tropical Aw maritime, tempéré et uniformisé par l'alizé (Peel et al., 2007), 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. La température moyenne journalière pour l'année 2020 était de 27°C et a varié de 23 à 32°C. La pluviométrie moyenne totale enregistrée de 2002 à 2021 est de 1098 mm (Station de Saint-Raphaël). Quatre systèmes de culture, répartis suivant le pédoclimat, coexistent (Dorvil et al., 2023). La couverture pédologique est constituée d'Haplic Cambisols, de Leptosols et de Régosols de type calcaire, de Vertisols, de Gleysols et de Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols (RELEC). À l'issue de ces calculs, une carte de distribution spatiale des SCOS à 0-30 cm a été réalisée (Figure 7). Des analyses approfondies réalisées sur 21 profils, faisant partie de notre dernière campagne de mesure révèlent que la texture est argilo-limoneuse dans la couche 0-30 cm au plateau et sablo-limoneuse aux versants et une grande partie de la vallée. Le code Munsell a été utilisé pour déterminer la couleur des sols lors de la description des profils en fosses pédologiques jusqu'à 100 cm. Le Tableau 1 présente quelques caractéristiques intrinsèques des principaux types de sol de Saint-Raphaël.

### Matériel

#### Matériel de terrain

- Fiches : pour la description des profils de sols de RMQS2 et d'Orstom 1980 ;
- Le code Munsell : pour déterminer la couleur des sols ;

- tarière : pour le prélèvement des échantillons de sols ;
- Cylindres (de 4 cm, 13 cm et 7 cm de haut) : pour le prélèvement des échantillons de sol pour l'estimation de la densité apparente totale et en terres fines ;
- machette/coutelas/couteau/spatule : pour ouverture de petites fosses de 50 cm, pour décrire les sols et évaluer la porosité ;
- récipients en plastique : pour préparer les composites ;
- sachets Zip transparent : pour l'emballage et l'identification des échantillons composites ;
- sacs de transport ;
- récepteur GPS pour les coordonnées géographiques des 78 parcelles ;
- marqueurs pour identifier les échantillons ;
- éprouvette de 500 ml pour mesurer le volume d'eau, pour des mesures de densité apparente par la méthode à l'eau ;
- gallon : pour apporter de l'eau ;
- téléphone/caméra : pour la prise des photos.
- conductimètre et pH-mètre : pour déterminer la conductivité électrique et le pH ;
- hydromètre et dessiccateur : pour déterminer la texture du sol ;
- Calcimètre de Bernard (colonne de 100 ml, ampoule réservoir, bouchon+robinet à 3 voies) : pour le dosage du calcaire total (carbone inorganique total) ;
- Des réactifs chimiques divers : HCL, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, CaCO<sub>3</sub>...
- Agitateurs magnétique : pour homogénéiser les solutions ;
- Centrifugeuse : pour homogénéiser les solutions de façon méticuleuse ;
- BROYER PM 400 : pour le broyage des sols ;
- Frigo : pour conserver les réactifs ;
- accessoires : pinces à bouts pointus, tubes, portoirs, spatules, gants, microplaques, réactifs divers...

#### **Matériel de laboratoire**

- Spectromètre Flash 2000 (Organic Elemental Analyzer) : pour analyse CN, méthode dite CHN
- nacelles en étain : pour la réception des échantillons à peser et pour analyses au spectre suivant deux colonnes 1000°C ;
- Balance analytique au 1/10 mg : pour CN depuis l'ordinateur ;
- Balance électronique : pour peser les échantillons ;
- mortier et pilon : pour le broyage des sols ;
- tamis de 2 mm, de 200 µm et de 180 µm) : pour tamiser les sols en vue (> 2 mm) ;
- étuve : pour sécher à 105° C les échantillons de sols ;

#### **Méthodes**

##### ***Échantillonnage***

Trois campagnes de prélèvements d'échantillons et de descriptions de sols ont été réalisées sur 90 parcelles paysannes (Figure 1a). 16 parcelles ont été sélectionnées dans le système de pâturage permanent (SSU), 31 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 1b). Une fosse pédologique a été ouverte au milieu de chacune. Au total 21 fosses pédologiques ont été ouvertes sur une profondeur d'un mètre et 69 jusqu'à 0,5 mètre. 345 échantillons composites ont été prélevés sur l'ensemble des 90 parcelles. 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 pour les couches 0-30 cm, 30-50 cm et 50-100 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) par strate d'épaisseur**

Deux méthodes de prélèvement ont été adoptées pour cette mesure : (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 strates d'épaisseur : 0-10 cm, 10-30 cm et 30-50 cm. Le nombre de strates est fonction des conditions du milieu (pente, pierrosité). Cette méthode a été adoptée dans les parcelles où l'usage des cylindres parait impossible. (ii) La méthode de cylindre consiste à utiliser trois cylindres ou carottiers de volumes différents (95 cm<sup>3</sup>, 222,5 cm<sup>3</sup> et 75 cm<sup>3</sup>).

Les prélèvements des échantillons composites ont été effectués suivant cinq strates d'épaisseur : 0-4 cm ; 4-17 cm, 17-30 cm, 30-43 et 43-50 cm (parcelles 43 à 69). Pour les fosses d'un mètre (parcelles 70 à 90), ils ont été effectués suivant quatre strates d'épaisseur avec au moins trois répétitions par strates : 0-10 cm, 10-30 cm, 30-50 cm et 50-100 cm. Tous les échantillons prélevés ont été pesés à l'état sec après 48 heures de séchage à 105°C à l'étuve. Par ailleurs, la fraction d'éléments grossiers (> 2 mm) a été séparée de celle en terre fine (≤ 2 mm) au moyen d'un tamis de 2 mm.

#### **Dosage de la teneur en carbone organique total (COT) et d'azote total (Nt)**

L'estimation du stock de carbone organique du sol (COS) consiste à mesurer au préalable la concentration en carbone organique total (COT) de la terre fine à différente épaisseur de la couche de sols prélevée. Ces mesures ont été effectuées au laboratoire de l'UMR-Eco&Sol par combustion sèche à l'aide d'un analyseur de type CHN. La décarbonatation a été préalablement effectuée par l'attaque de l'acide chlorhydrique dilué au 1/3 à partir de laquelle

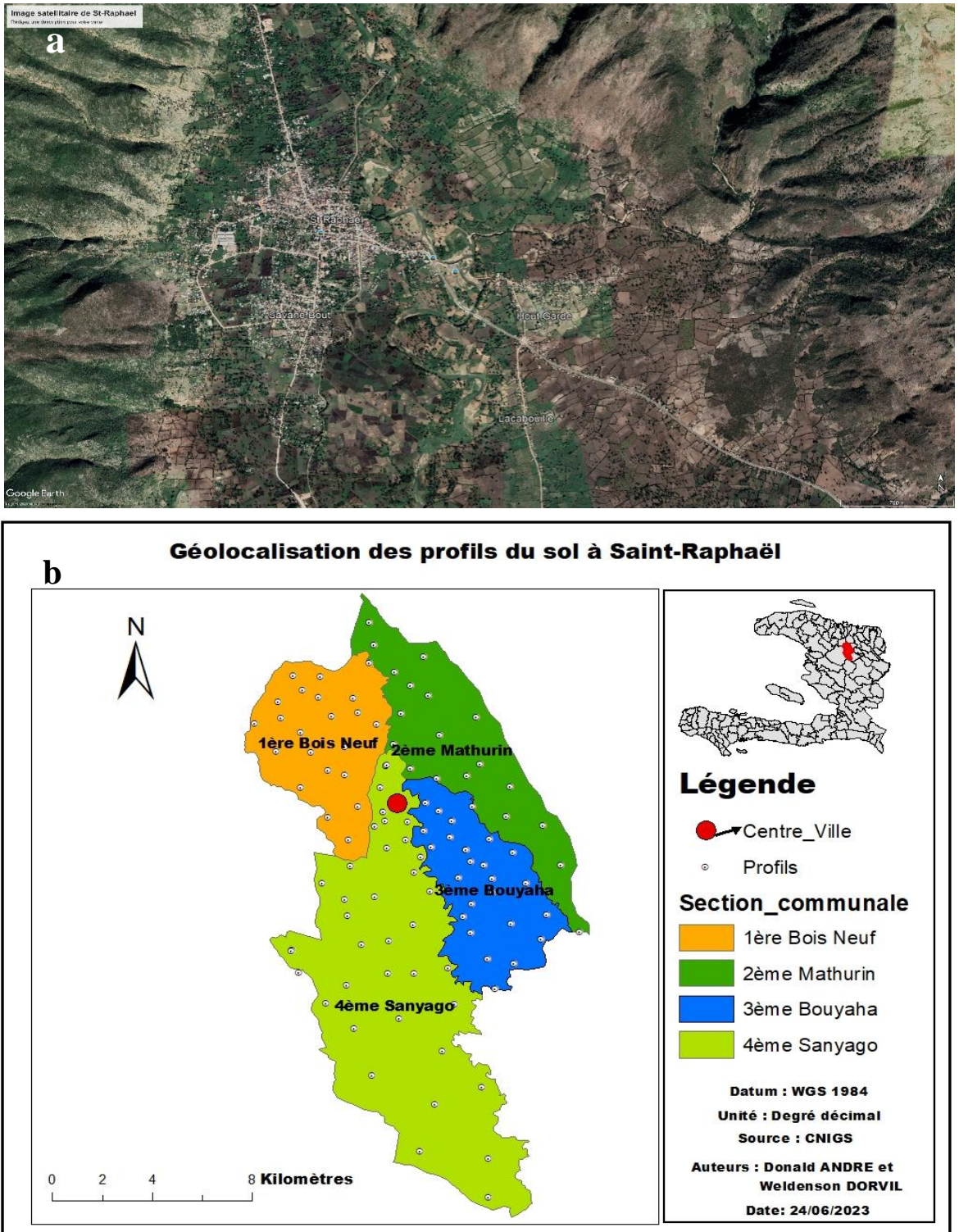
le calcaire total et le carbone inorganique total (CIT) ont été dosés. Ainsi, la teneur en COT résulte de la différence entre le carbone total (CT) issu du CHN et le CIT issu du calcimètre de Bernard. Pour estimer le stock de COS, ce modèle mathématique a été utilisé selon la formule :  $COS = COT * Da * H * ((1 - E) / 10)$  où : COS : Carbone organique du sol en Mg ha<sup>-1</sup> ; COT : la concentration en carbone organique total en g 100 g<sup>-1</sup> ; Da : densité apparente totale en g cm<sup>-3</sup> ; H : épaisseur de la couche en cm et E : % d'éléments grossiers > 2 mm de diamètre. Le stock d'un profil de sol donné est la somme des stocks des différentes couches du profil prélevées. À l'issue de ces calculs, une carte de distribution spatiale des stocks de COS a été réalisée (Figure 7) et deux modèles d'équations relatifs à la distribution des concentrations en carbone total et d'azote ont été suggérés (Figure 9).

#### **Autres paramètres physico-chimiques analysés**

Sur les échantillons composites ont été déterminés (Laboratoire du Campus Henry Christophe, Limonade) le pH (ISO 10390) et la conductance spécifique est déterminée au conductivimètre dans le surnageant d'une suspension dans l'eau de l'échantillon (rapport 1/2) (ISO 11265) ; 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 ; le phosphate extractible est obtenu par la méthode d'Olsen modifiée par Dabin.

#### **Analyses statistiques**

L'analyse et le traitement des données ont consisté en des calculs de stocks moyens de COS et de leur variabilité suivant les différents facteurs considérés susmentionnés. La comparaison des stocks de carbone des sols et d'autres paramètres selon les facteurs étudiés a été réalisée par l'analyse de variance. Les comparaisons multiples de Fisher LSD ont été effectuées pour tester et afficher le niveau de confiance à 95%. Le logiciel statistique STATISTICA 7 a été utilisé (Hilbe, 2007).



**Figure 1:** Image satellitaire de Saint-Raphaël (a) et Géolocalisation des profils du sol (b).

**Tableau 1 :** Données pédologiques issues de la troisième campagne de description des sols (Juin à Juillet 2023).

Profil	Profondeur (cm)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	Da <sub>f</sub> (g cm <sup>-3</sup> )	pH eau	Ntot	E. G.	COT	Couleur	Sol
<b>Système Intensif (SI)</b>									
1 (P6)	0-10	1,84	1,32	8,01	0,13	0,015	2,26	7.5YR 4/1	Vertisol
	10-30	1,60	1,39	8	0,08	0,036	1,84	10YR 5/3	
	30-50	1,73	1,4	7,84	0,16	0,015	2,39	10YR 5/3	
	50-100	1,90	1,18		0,10	0,001	1,64	10YR 6/4	
2 (P14)	0-10	1,54	1,953	7,96	0,22	0,025	1,94	10YR3/1	Gleysol
	10-30	1,80	1,922	8,04	0,21	0,004	0,39	10YR3/1	
	30-50	1,67	1,291	8,16	0,182	0,012	0,43	10YR4/3	
	50-100	1,61	1,24		0,073	0,023	0,35	7.5YR 5/6	
<b>Système semi-intensif (SSI)</b>									
3 (BF4)	0-10	1,40	1,41	7,8	0,26	0,051	0,94	10YR 4/3	Vertisol
	10-30	1,44	1,35	8,03	0,21	0,036	2,06	10YR 6/4	
	30-50	0,99	1,36	8,04	0,31	0,030	1,54	10YR 5/3	
	50-100	0,93	1,42		0,20	0,034	2,95	10YR 5/3	
4 (BF2)	0-10	1,80	1,996	7,98	0,34	0,005	1,849	5Y2.5/6	RELEC
	10-30	1,61	1,761	8,08	0,28	0,00	1,07	5Y2.5/6	
	30-50	1,84	1,955	8,01	0,127	0,078	0,54	5Y3/4	
	50-100	1,60	1,97		0,096	0,089	0,26	5Y3/6	
<b>Système Agroforestier (SA)</b>									
5 (MF1)	0-10	0,82	1,25	7,81	1,01	0,083	5,57	10YR 5/3	RELEC
	10-30	0,83	1,27	7,93	0,63	0,087	6,83	10YR 5/4	
	30-50	1,52	1,37	7,98	0,28	0,025	7,23	10YR 5/4	
	50-100	1,49	1,31	8,06	0,24	0,044	7,53	10YR 2/2	
6 (SM)	0-10	1,27	1,06	7,98	0,36	0,026	6,07	10YR 3/3	Vertisol
	10-30	1,06	1,32	8,03	0,25	0,057	3,65	10YR 3/3	
	30-50		1,27	8,26			1,9	7.5YR 4/3	
	50-100		1,54				1,83	7.5YR 5/6	
<b>Système de pâturage permanent (SSU)</b>									
7 (BN)	0-10	0,96	1,38	7,97	0,33	0,035	4,67	10YR 5/2	Régosol
	10-30	1,17	1,41	7,92	0,21	0,042	3,71	10YR 6/1	
	30-50	1,53	1,45	7,14	0,14	0,040	1,60	10YR 8/1	
	50-100	1,83	1,56		0,05	0,005	0,73	7.5YR 8/1	
8 (BF1)	0-10	1,33	1,296	7	0,035	0,037	2,02	<b>10YR5/1</b>	Leptosol
	10-30		1,32	8,7	0,060		0,65	10YR 4/2	
	30-50		1,486	7,63	0,027		1,67	<b>10YR5/1</b>	
	50-100	1,39	1,53		0,12	0,068	0,53	<b>7.5YR8/1</b>	

Da<sub>f</sub>: densité apparente en terres fines ; E.G. : éléments grossiers.

## RÉSULTATS

### Estimation de la densité apparente du sol (Da)

Dans les 100 premiers centimètres du sol, la densité apparente totale varie de 1,30 g cm<sup>-3</sup> en SSU à 1,36 g cm<sup>-3</sup> en SI suivant une moyenne de 1,34 g cm<sup>-3</sup> (Figure 2a). Toutefois, la densité apparente en terre fine (Da<sub>tf</sub>) varie de 1,07 g cm<sup>-3</sup> en SSU à 1,24 g cm<sup>-3</sup> en SI pour une moyenne de 1,15 g cm<sup>-3</sup> (Figure 2b). On constate une distribution plus ou moins normale des valeurs de Da car leur moyenne et leur médiane sont très proches. Aucune différence significative au seuil de 5% n'est observée pour les valeurs de Da. Dans la couche 50-100 cm, la valeur moyenne de Da est de 1,54 g cm<sup>-3</sup>. À 0-30 cm, la classe granulométrique dominante en SI est l'argile soit 52,1%. Viennent ensuite le limon (34,06%) et le sable (11,8%) (Tableau 2). Caractérisés par un pH basique, les sols sont très pauvres en Phosphore variant de 0,27 (SSU) à 0,43 µg g<sup>-1</sup> (SA) dans la couche 0-30 cm (Tableau 2).

### Distribution verticale des concentrations en COT et en N total

La Figure 3 présente la distribution verticale des teneurs en carbone organique total et en azote total des sols. Dans l'horizon de surface 0-10 cm, sont repérées les plus fortes teneurs moyennes en COT (3,7 g 100 g<sup>-1</sup>) et en N total (0,275 g kg<sup>-1</sup>). Le test de Fisher LSD montre que les quatre couches de sols analysées sont statistiquement différentes pour le carbone. La distribution verticale de la valeur moyenne en azote total montre moins de différence entre les couches (Figure 3b). Notons cependant que la couche 50-100 cm est presque exempte d'azote total.

La Figure 4 présente la distribution verticale des principaux types de sols inventoriés à Saint-Raphaël. Les RELEC (Figure 4a) et les Vertisols (Figure 4b) sont relativement semblables en termes de distribution verticale du C. On observe que leur concentration en C excède 5 g 100 g<sup>-1</sup> dans la couche 0-10 cm de certains profils. Toutefois, comme dans tous les sols, de faibles teneurs en

COT (< 1 g 100 g<sup>-1</sup>) y sont également repérées. On constate qu'il y a du C dans les horizons du sous-sol de tous les types de sol mais ces concentrations n'excèdent pas 1 g 100 g<sup>-1</sup>. Les valeurs de C nous montrent une grande hétérogénéité dans leur distribution (horizontale et verticale) avec une plus grande importance au-delà de 30 cm du sol. Des traces d'azote sont également repérées dans les horizons 50-100 cm.

### Variation de la teneur en carbone et d'azote total en fonction des systèmes de culture

À 100 cm, la teneur en COT (n = 90) varient respectivement de 2,12 g 100 g<sup>-1</sup> en SSU à 2,83 g 100 g<sup>-1</sup> en SA (Figure 5a) pour une moyenne de 2,48 g 100 g<sup>-1</sup> (Figure 5b). La teneur en N total, estimée dans la couche 0-50 cm, varie de 0,18 g kg<sup>-1</sup> en SSU à 0,24 g kg<sup>-1</sup> en SA (Figure 5c) suivant une moyenne de 0,22 g kg<sup>-1</sup> (Figure 5d). L'effet significatif au seuil de 5% est observé entre les systèmes de culture pour ces deux indicateurs du statut organique des sols.

### Variation de la concentration en COS et d'azote total par type de sol

Parmi les six types de sols inventoriés à Saint-Raphaël, les Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols (RELEC) présentent le niveau de stock de COS le plus élevé dans le premier mètre du sol, 203 MgC. ha<sup>-1</sup> suivi des Vertisols, 181 MgC. ha<sup>-1</sup>. Ce sont les seuls types de sols présentant des stocks de COS > 180 MgC. ha<sup>-1</sup> (Tableau 3). Les Haplic Cambisols, les Leptosols et les Régosols, positionnés majoritairement dans les versants, sont les plus pauvres en termes de carbone organique. Cette même tendance est constatée pour la teneur en Azote Total variant de 0,15 g kg<sup>-1</sup> pour les Haplic Cambisols à 0,38 g kg<sup>-1</sup> pour les RELEC (Tableau 3). Les Leptosols, dominant les versants, sont rencontrés dans trois systèmes de culture : SSU, SSI, SA. Il en est de même des Régosols. Les Haplic Cambisols dominant également les versants et les mornes se rencontrent dans les systèmes SSI et SSU et présentent le niveau de stock de



COS le plus élevé, les RELEC dominant les SA et les SSI.

Sur le plan géomorphologique, la Vallée, soumises aux pratiques agroforestières, indique le niveau de stock de COS le plus élevé (198 MgC. ha<sup>-1</sup>) et le plus faible stock de COS est enregistré dans les mornes et les versants, 151,3 MgC. ha<sup>-1</sup>.

#### **Estimation du stock de COS selon les systèmes de culture et la profondeur**

Dans le premier mètre du sol, le stock moyen de COS est de 174 MgC ha<sup>-1</sup> (Figure 6b). Ce stock varie de 128,55 MgC. ha<sup>-1</sup> en SSU à 196,44 MgC. ha<sup>-1</sup> en SA (Tableau 4). Des différences significatives ( $p < 0,05$ ) sont observées selon la profondeur du sol (Tableau 4) et selon les systèmes de culture (Figure 6a). Le stock moyen pour la couche 50-100 cm est de 42,16 Mg C ha<sup>-1</sup>.

#### **Distribution spatiale des stocks de carbone (SCOS) à 0-30 cm**

Une carte des stocks de COS à l'échelle régionale a été réalisée sur le logiciel ArcGIS en utilisant l'un des meilleurs modèles d'ajustement (Figure 7 ; Tableau 3). Après projection des points sur la carte, elle a été effectuée suivant les valeurs moyennes de COS obtenues sur l'ensemble des profils réalisés. Les sept classes ont été définies suivant des échelles appropriées et du nombre de répétition relatif aux valeurs de stock de COS. On a pu constater que la distribution spatiale des stocks de carbone de Saint-Raphaël a été influencée par l'altitude, le niveau de dégradation des sols et de l'indice sol-végétation, donc les systèmes de culture. Globalement, dans les 50 premiers centimètres du sol, la carte indique que les valeurs des stocks de COS les plus élevés appartiennent au système agroforestier (SA) qui se positionne au niveau de la vallée de Bois Neuf et de grande superficie de plateau de Bouyaha.

#### **Analyses des liens entre la fertilité et le carbone du sol associant la texture fine du sol**

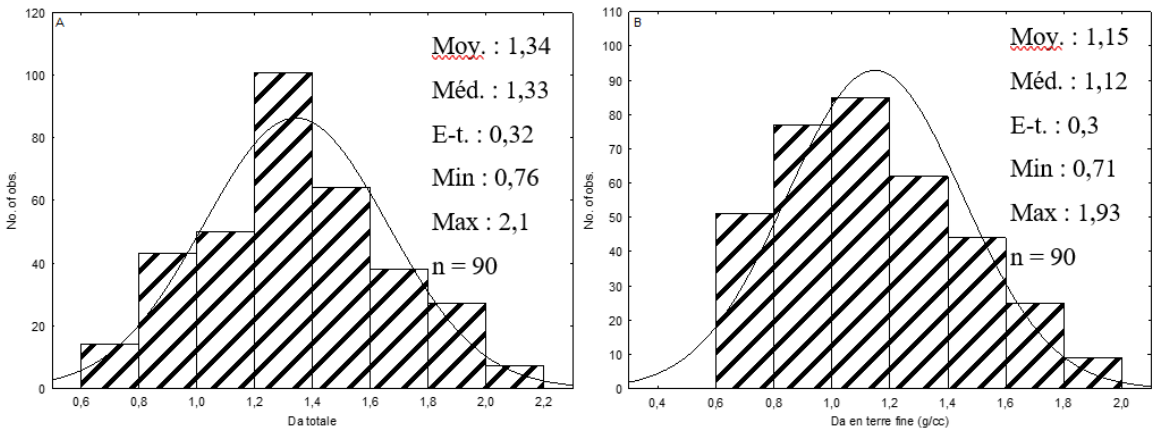
Il convient de rappeler que ce travail de recherche visait, outre la distribution verticale des stocks de COS, à établir un lien entre le stockage de carbone et la fertilité des sols. Toutefois, on suppose que l'effet des systèmes de culture sur le stockage n'était pas suffisant pour argumenter ce possible lien. Pour rendre possible cette relation, le ratio entre les teneurs moyennes en COT et en argile de la couche 0-50 cm du sol a été calculé (Tableau 5), ensuite nous avons établi le lien entre les systèmes de culture et le rapport COT/argile (Figure 8). Ce ratio varie de 47 à 85 milligramme par gramme d'argile respectivement en SSU et SA avec un effet significatif en SA et SSI. On voit que l'effet des systèmes de culture sur le ratio COT/argile argumente le niveau de fertilité constaté dans le système agroforestier et possiblement en SSI. Nous pouvons donc ainsi avancer que les stocks élevés de COS constatés dans le système agroforestier justifient le niveau de fertilité de ces sols soumis à ces pratiques agricoles durables.

#### **Modélisation de la variabilité verticale du carbone et d'azote total**

Les analyses sur la distribution verticale du COT et d'azote total nous ont suggéré des possibles modèles de distribution significatifs du carbone et de l'azote en fonction de la profondeur (Figures 9a et b). Ainsi, ces modèles d'équations logarithmiques pour l'estimation de la variabilité verticale des concentrations en COT et en Nt sont présentés selon les équations suivantes :

$$Y_{(COT)} = 12,888 \ln(x) - 40,804 \quad (3), \text{ avec } R^2 = 0,1774 \text{ et une probabilité } p = 1\% ;$$

$$Y_{(N_{total})} = 12,64 \ln(x) + 0,7274 \quad (4), \text{ avec } R^2 = 0,2445, \text{ significatif à } 5\%.$$



**Figure 2 :** Histogrammes de distribution des valeurs de Da totale du sol (A) et (B) de Da en terres fines (B) à 100 cm.

**Tableau 2:** Caractéristiques générales des sols selon les différentes profondeurs prélevés (n = 90).

Couche (cm)	SI	SSI	SA	SSU	Couche (cm)	SI	SSI	SA	SSU
<b>P<sub>Olsen</sub> (µg g<sup>-1</sup>)</b>					<b>CT</b>				
0-30 cm	0.437	0.317	0.349	0.274	0-50 cm	6,32	6,24	1,17	5,48
<b>pH 0-50 cm</b>					<b>CIT (0-50 cm)</b>				
	8,06	8,01	7,96	7,78		4,25	3,77	2,54	3,52
<b>Granulométrie (0-30 cm)</b>					<b>Rapport C/N</b>				
Argile	52,1	44,17	38,68	25.25	0-30 cm	12,65	9,30	11,78	14,96
Limon	34,06	40,41	48.68	31.25	30-50 cm	10,53	12,93	11,4	11,60
Sable	11,8	15,41	12,5	40.50	<b>CE (0-30 cm)</b> 6,3 6,5 4,72 5,9				

**Tableau 3 :** Statistiques descriptives du stock COS (MgC. ha<sup>-1</sup>) des différents types de sols à profondeur fixe 0-100 ainsi que de l'azote total et du rapport C/N dans l'horizon de surface. Les valeurs suivies d'une même lettre indiquent l'effet non significatif au seuil de 5% par type de sol.

Sol	Couche 0-100 cm					50-100 cm				N total	
	n	Moy.	Méd.	Min.	Max.	Moy.	Méd.	Min	Max.	Nt (0-30 cm)	C/N (0-30 cm)
Leptosol	5	105 a	112	24,6	171	26,2 b	27,2	12,4	37,06	0,16 a	7,85
Régosol	10	145.03 b	143	85,3	205	34.4 b	35,7	27,2	41,1	0,19 a	8,98
RELEC	40	203 c	201	23,1	398	52,8 a	42,6	17,2	113.2	0,38 b	11,86
Vertisol	21	181 c	188	48,5	259	44.3 a	34,1	17,8	122	0,20 a	11,15
Gleysol	8	154 b	167	25,9	225	27,1 b	30,4	14,1	33,6	0,18 a	13,82
Haplic C.	6	80,57 a	59	59	167	21,5 b	21,5	21,1	21,8	0,15 a	8,75

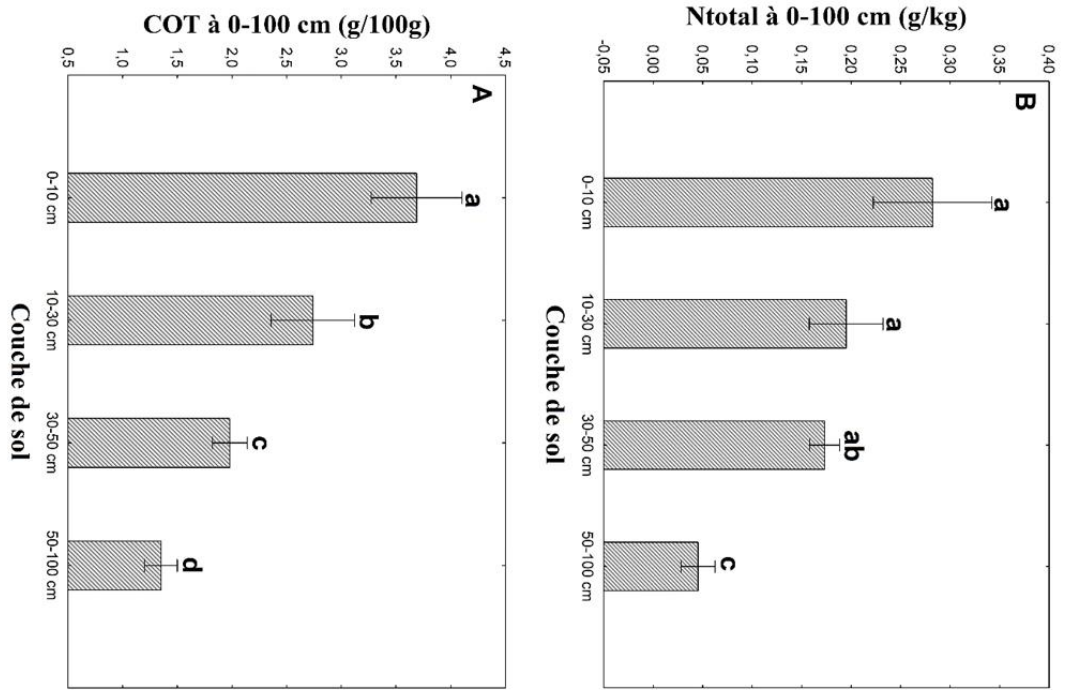


Figure 3 : Distribution verticale des teneurs en carbone et en azote total à 0-100 cm

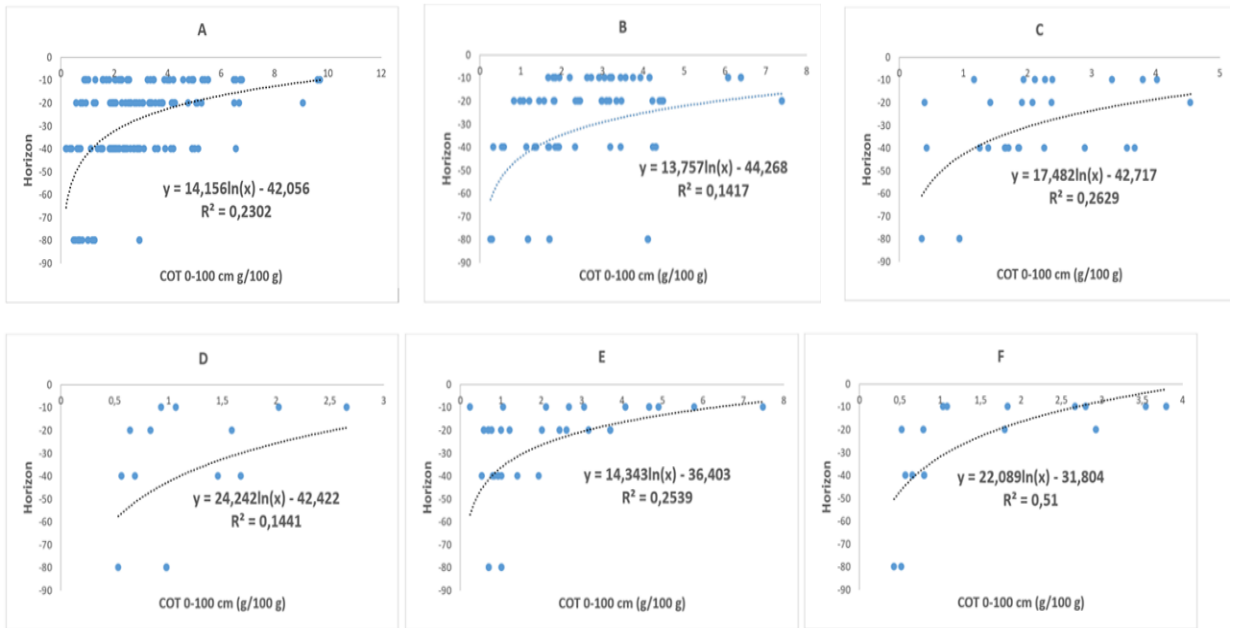
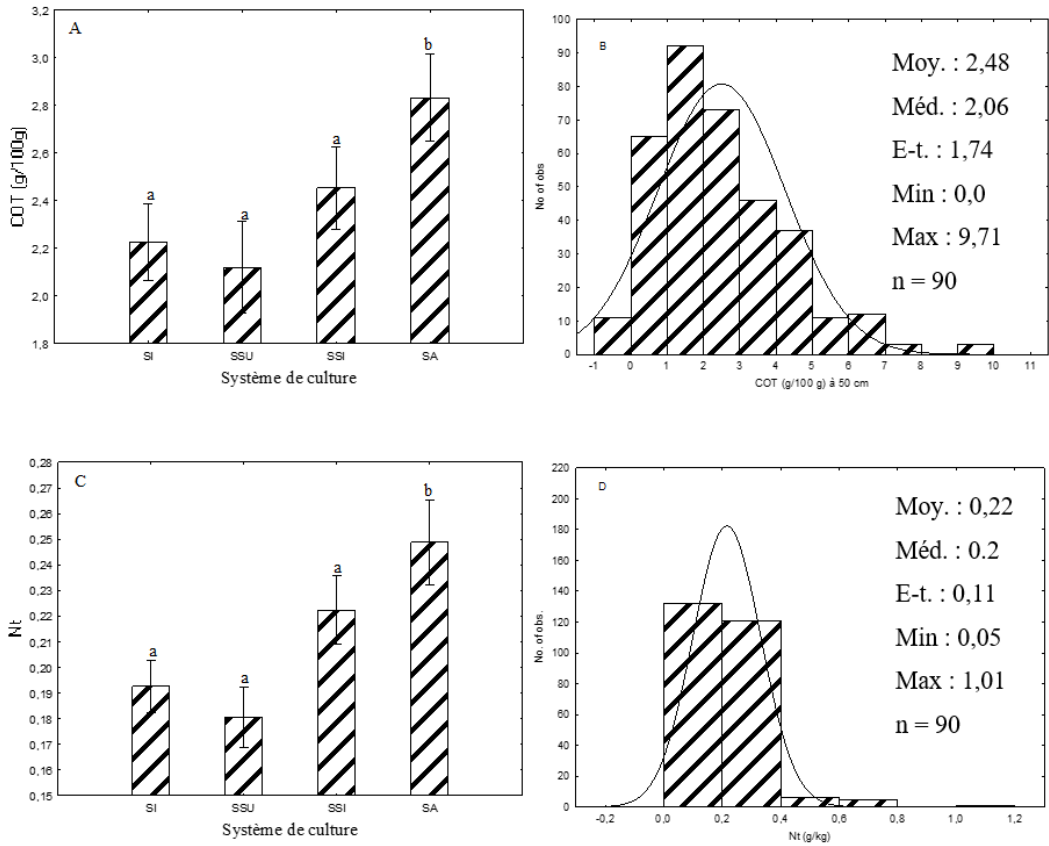


Figure 4 : Distribution verticale des teneurs en carbone en fonction des types de sol.

Avec A : RELEC, B : Vertisol, C : Gleysol, D : Leptosol, E : Régosol, F : Haplic-Cambisol.  $p = 1\%$ .

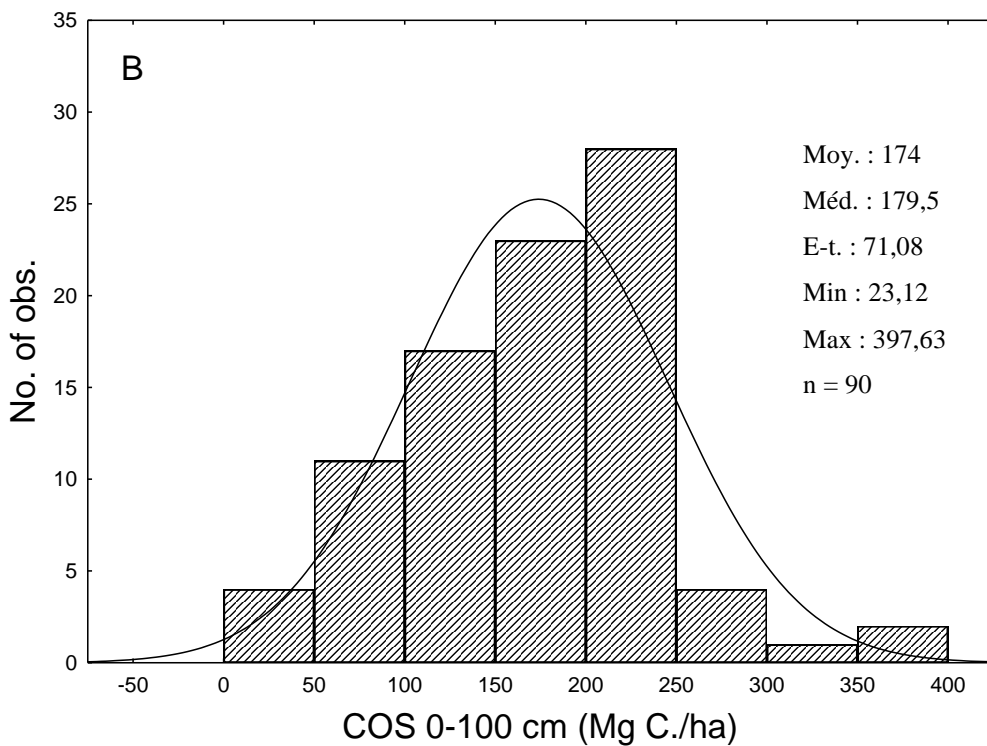
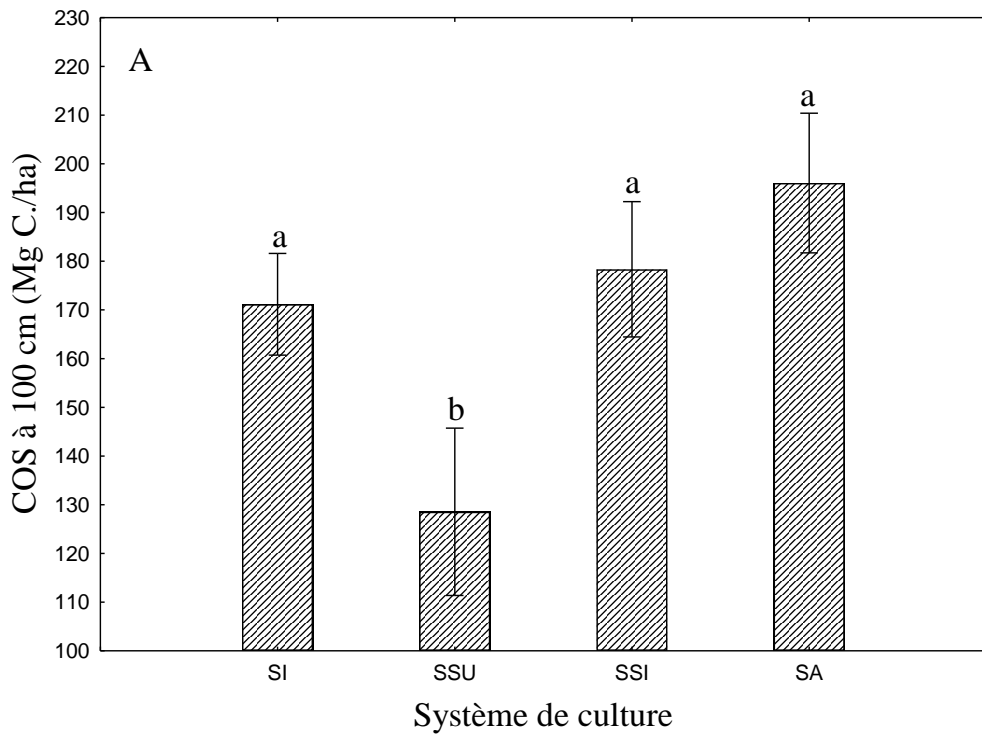


**Figure 5:** Histogrammes de distribution (n=90) et statistique descriptive des concentrations en Carbone organique total (0-100 cm) et en azote total (0-50 cm) en fonction des systèmes de cultures.

**Tableau 4 :** Variation des stocks COS (MgC. ha<sup>-1</sup>) en fonction des systèmes de culture et des profondeurs.

Couche (cm)	SI	SSI	SA	SSU
0-30	85,99 a	91,41 a	106,5 a	88,4 a
30-50	52,05 b	44 b	47,5 b	26,02 f
50-100	33,07 c	42,8 c	42,4 c	13,78 d
<b>0-100</b>	<b>171,15 d</b>	<b>178,3 d</b>	<b>196,44 d</b>	<b>128,55 e</b>

Les valeurs suivies d'une même lettre indiquent l'effet non significatif au seuil de 5% à 100 cm de profondeur du sol. Le stock de COS pour la couche 0-100 cm résulte de la somme des valeurs des stocks des couches 0-30, 30-50 et 50-100 cm.



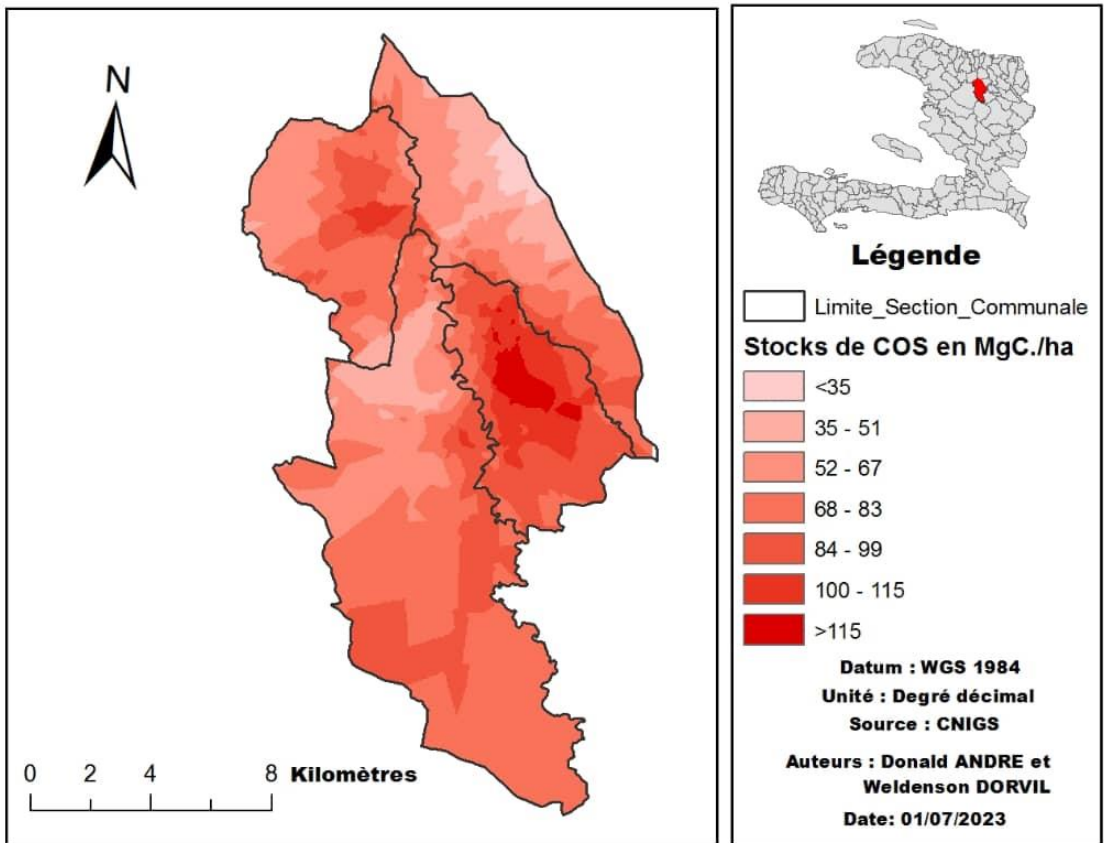
**Figure 6 :** Histogrammes de distribution des valeurs (n = 90) des stocks COS en fonction des systèmes de culture (A) et analyse descriptive du Stock de COS (B) en Saint-Raphaël.

**Tableau 5** : Statistique descriptive du ratio COT/argile dans la couche 0-50 cm.

Système de culture	% Argile (0-50 cm)	COT 0-50 cm	Rapport COT/argile
Système intensif (SI)	50,7*	2,18*	0,047*
Système semi-intensif SSI)	47,8*	2,7**	0,061**
Système agroforestier (SA)	46,7*	2,96**	0,085**
Système de pâturage (SSU)	42,2**	2,24*	0,048*

\* : effet non significatif ; \*\* : effet significatif au seuil de 5%.

**Stocks de COS de la commune de Saint-Raphaël**



**Figure 7** : Spatialisation du stock de COS 0-50 cm.

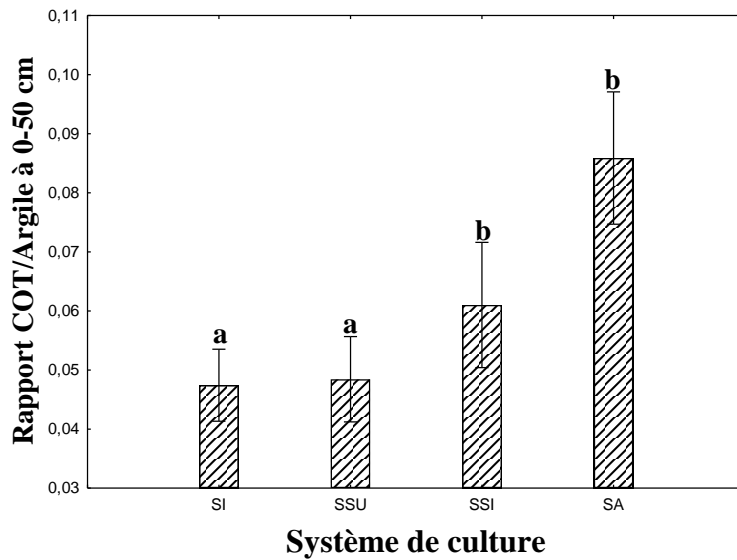


Figure 8 : Influence des systèmes de culture sur le rapport COT/argile à 0-50 cm.

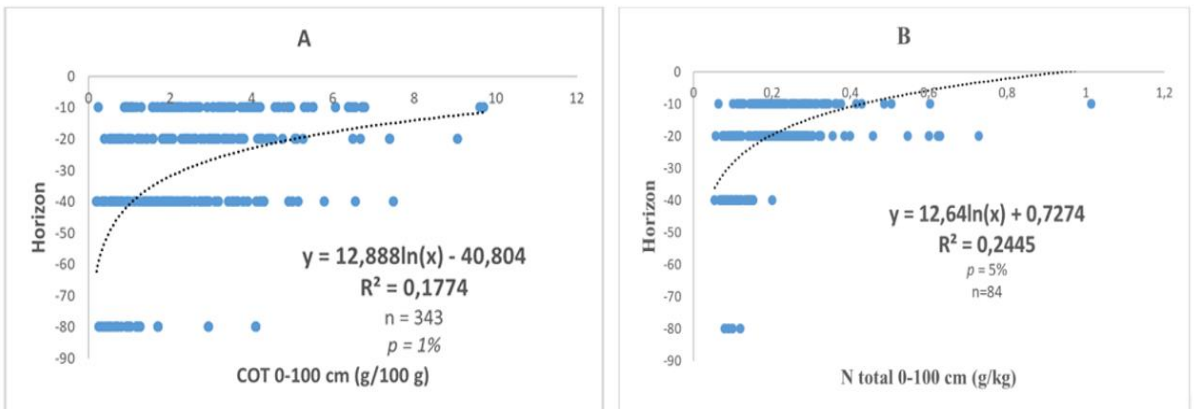


Figure 9 : Courbes logarithmiques relatives à la prédiction de la variabilité verticale des concentrations en carbone et d'azote totale.

## DISCUSSION

Nos résultats ont montré une plus forte concentration en COT dans les 10 premiers centimètres du sol, soit  $3,7 \text{ g } 100^{-1}$  ou  $37 \text{ g de C par kg de sol}$ . Cela se traduit par de l'effet de l'ensemble de ces couches sur les restitutions de la MOS. Toutefois, une grande variabilité des valeurs moyennes en COT s'observait dans les horizons profonds (30-50 cm et 50-100 cm). Dans la couche 50-100 cm, nous étions basés sur les préoccupations suivantes : combien y a-t-il de carbone et

d'azote dans cet horizon ? Et, combien y a-t-il de terre fine (sol < 2 mm) dans ces horizons profonds y compris dans les sols pierreux ? Comme indiqué dans nos résultats, nous avons repéré du carbone et de l'azote total à l'état de trace dans l'horizon profond (50-100 cm). Nous en avons repéré très peu de terre fine dans les sols de versants (Régosols, Leptosols et Haplic Cambisol). Toutefois, elle est plus importante dans les sols de plateau et de vallée dominés respectivement par des Vertisols et des RELEC. Les RELEC et les Vertisols ont

également montré une forte variation des stocks de COS à 50-100 cm variant respectivement de 17,2 à 113,2 MgC ha<sup>-1</sup> pour une moyenne de 52,8 MgC ha<sup>-1</sup> et de 17,8 à 122 MgC ha<sup>-1</sup> suivant une valeur moyenne de COS de 44,3 MgC ha<sup>-1</sup>. La présence de la MOS dans cet horizon peut être expliquée par l'influence des systèmes racinaires (Xiao et al., 2020 ; Cardinael et al., 2020). D'ailleurs, cela a été confirmé dans nos travaux d'inventaires pédologiques.

Nous basant sur les systèmes de culture, la plus forte concentration en COS a été repérée dans le système agroforestier (SA). Cela pourrait être expliqué, d'une part de l'enracinement plus profond des arbres agroforestiers (Mulia et Dupraz, 2006) et d'un effet décompactant facilitant une meilleure circulation de l'air et de l'eau et favorisant le stockage de COS. Dougherty et al. (2007) et Duchemin (2007) ont rapporté que ces systèmes racinaires contribuent également à alimenter toute la chaîne biologique du sol. D'autre part, la combinaison d'arbres et de cultures associées à l'élevage fournit à la fois une plus grande richesse et une plus grande complexité de niches écologiques, dans le temps et l'espace, que les cultures annuelles (Jose et al., 2004, Gyssels et al., 2005, Dorvil et al., 2023). De son côté, Jose (2009) a prouvé dans ses travaux la contribution de l'agroforesterie à la connectivité des habitats dispersés ou dégradés par la création de corridors biologiques. On pourrait aussi espérer plus de diversité d'auxiliaires et réduire ainsi les problèmes phytosanitaires des cultures (Dorvil et al., 2023).

En effet, les valeurs de stock de COS obtenues à Saint-Raphaël sur un mètre de profondeur corroborent celles relatées dans les travaux d'Adoum et al., (2017). Sur un site à prédominance Fluvisol soumis sous riziculture, après l'implémentation d'une prairie temporaire, les stocks de COS à un mètre étaient de 194 Mg C ha<sup>-1</sup>. Il en est de même des travaux de Gardi et al. (2014) rapportant un stock de COS de 185 Mg C ha<sup>-1</sup>.

Dans nos résultats, nous avons montré le lien entre la fertilité des sols associant l'argile et la concentration en COT. Nous avons remarqué que les quatre systèmes de

culture ont presque la même teneur en argile, raison d'avoir du mal à argumenter le rôle de l'argile sur le stockage de carbone. Pour ce faire, nous avons ensuite établi un rapport entre les valeurs moyennes du COT et la teneur en argile à 0-50 cm (Tableau 5). Ensuite, l'effet des différents systèmes de culture sur le rapport COT/argile nous a permis d'argumenter le niveau de la fertilité constaté dans le système agroforestier voire le SSI également. Ce qui argumente une fois de plus le niveau le plus élevé des stocks de COS dans le système agroforestier. À ce stade, on peut donc avancer que cette différence observée dans les valeurs des stocks de carbone est bien liée aux effets des systèmes de culture. Ce qui argumente l'hypothèse avancée par de nombreux auteurs indiquant l'effet de la texture fine du sol sur l'amélioration de la fertilité des sols via son rôle protecteur à l'égard de la MOS (Balesdent et al., 2000 ; Chevallier et al., 2010 ; Feller et Chenu, 2012 ; Heywood et Turpin (2013).

En conséquence, plus la proportion en carbone organique associée aux particules fines est forte, plus le COS sera considéré comme stable (Barré et al., 2020). Nos résultats ont montré, en raison de sa plus forte concentration en COS, que le système agroforestier peut augmenter la production agricole, améliorer le stockage et la séquestration du carbone organique et du coup atténuer les émissions de gaz à effet de serre, réduire l'érosion des sols, conserver la biodiversité et améliorer la fertilité des sols et la sécurité alimentaire en Haïti (Tsonkova et al., 2014 ; Torralba et al. 2016 ; Kim et Isaac, 2022, Dorvil et al., 2023). Enfin, l'agroforesterie est donc une pratique pouvant concilier performance agronomique/fertilité et préservation de l'environnement à Saint-Raphaël.

Nos résultats ont montré que les valeurs de concentration en azote total ont été significativement affectées par les systèmes de culture, les types de sol et la profondeur du sol. Ces résultats corroborent ceux de Marchão et al. (2009), de GIEC (2006), Grinand et al. (2009), de Derrien et al. (2016) et de la FAO (2017). La teneur en azote total était plus faible dans les systèmes de culture intensifs (SI) à prédominance des cultures maraîchères et de riz ainsi que dans le système de pâturage



permanent (SSU). Dans le SI, ces différences, estimées à 21% en N total par rapport au SA, résultent de la faible restitution de la matière organique du sol (MOS) associée au labour répété et profond du sol et du brûlis des résidus de récolte. Contrairement au SI, les différences en N total observées dans le système semi-intensif (SSI) sont quasiment faible (6%) par rapport au SA. Cette amélioration de la fertilité résulte de la pratique de jachère combinée des pratiques de rotation des légumineuses et de la diversification culturale (Dorvil et al., 2023).

Dans nos travaux, le système de pâturage permanent (SSU) n'indique pas d'effet positif sur le stockage de COS et de l'azote total. Ces résultats corroborent ceux de de Corbeels et al. (2006) et de Marchão et al. (2009). Dans ce système, une différence respective des stocks de COS et d'azote totale de 35% et de 26% par rapport au système agroforestier (SA) a été observée. Le faible apport en N total constaté limite la productivité des terres soumises au pâturage permanent. Généralement, les sols situés dans les versants sont dégradés en raison des faibles restitutions organiques provoquées par le brûlis régulier des terres, le déboisement et l'érosion hydrique (Dorvil et al., 2023).

La plus forte concentration en N total et en COT constatée au système agroforestier (SA) confère au sol une meilleure fertilité par rapport aux autres systèmes cultivés. Associé aux arbres, ce système est caractérisé par une forte diversité d'espèce cultivée (jusqu'à 9 espèces cultivées/parcelle/campagne) avec la valorisation des légumineuses : pois-congo, le haricot et le pois inconnu (Dorvil et al., 2023). Riches en azote, ces légumineuses transfèrent leurs résidus végétaux (feuilles, racines, nodules) dans la couche arable du sol. Ces composés organiques, une fois décomposés en azote inorganique, sont dissous dans la solution du sol et sont devenus des nutriments pour toutes les plantes (Kim et Isaac, 2022). Outre les légumineuses, les résidus de récolte et les excréments d'animaux (Jose et Dollinger, 2019) se décomposent également et augmentent la concentration en Nt au niveau de l'agrosystème. De leur côté, Wu et al. (2014) et Erktan et al. (2013 ; 2016) indiquent que de fortes densités de racines fines et d'hyphes

mycéliens en SA améliorent la stabilité des agrégats et le stockage de COS par différents mécanismes : **i**) une augmentation de la production d'exsudats racinaires, tels que les polysaccharides qui jouent le rôle de colle entre les particules du sol, **ii**) un meilleur piégeage des particules de sol facilité par l'enchevêtrement des racines et des hyphes, **iii**) une augmentation des alternances de cycles humectation-dessèchement du sol en relation avec l'acquisition de l'eau par les racines, **iv**) l'apport des résidus végétaux contenant des constituants (tels que hémicellulose, subérine ou composés phénoliques) qui participent à la stabilité des macro-agrégats et **v**) la stimulation de la production de métabolites microbiens qui sont impliqués dans la stabilité des micro-agrégats (Martins et Angers, 2015 ; Derrien et al., 2016).

Par ailleurs, Erktan et al. (2013) ont comparé plusieurs communautés végétales. Après analyses, ils ont rapporté que les communautés végétales constituées uniquement d'herbacées étaient constituées d'agrégats de faible dimension ( $0,8 \pm 0,09$  mm) alors que les forêts, constituées de plusieurs strates végétales (herbacées, lianes, arbustes, arbres), présentaient des agrégats de plus grande dimension ( $2,4 \pm 0,16$  mm), d'où une meilleure stabilité des agrégats pouvant être expliquée par la diversité biologique. Cette stabilité d'agrégats dépend aussi de la façon dont les racines se dispersent dans le sol (Forster, 2020). L'effet positif de cette diversité végétale dans ce système de production est aussi associé aux traits racinaires (Pohl et al. 2009 ; Martin et al. 2010).

Dans l'ensemble, nos analyses ont également montré une relative faible teneur en azote total (Tableau 41). Selon Homyak et al (2017), l'intensité et la durée de la sécheresse est l'une des causes de cet appauvrissement et peuvent être contrôlées par le biais d'un apport soutenu d'azote. Des études de terrain menées dans des systèmes agroforestiers ont démontré que les plantes cultivées en association avec des légumineuses peuvent obtenir une quantité substantielle d'azote des légumineuses variant de 30 à 90% de l'acquisition totale d'azote et peuvent contribuer à hauteur de 270-550 kg N. ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (Jalonen et al., 2009). En Haïti, une

valorisation des légumineuses pérennes comme le *Gliricidia sepium* est requise. Selon Dulorme et al., (2003), cette espèce arborescente peut fournir des apports considérables d'azote pouvant atteindre jusqu'à 400 kgN. ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> aux plantes associées non fixatrices d'azote.

Faits marquants, nous avons constaté que la plus grande concentration en Nt se trouve emmagasinée dans les couches superficielles du sol (0-10 cm et 0-4 cm). Exposées aux risques de minéralisation et/ou de dénitrification par des températures élevées et des bactéries dénitrifiantes, ces concentrations d'azote doivent être assimilées rapidement par les plantes. La température idéale est habituellement entre 25°C et 35°C (Andrianarisoa et al., 2009). D'où la nécessité de promouvoir l'agroforesterie qui confère au sol une couverture adéquate et un renouvellement permanent de la MOS. Toutefois, en plus de la température, Wang et al. (2021) ont signalé que la minéralisation et la nitrification de l'azote sont régulées par plusieurs autres facteurs dans l'agroforesterie : l'humidité du sol, la disponibilité en azote essentiellement celle du NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Booth et al., 2005) et le rapport C/N. De leur côté, Chevallier et al. (2015) ont rapporté que la destruction de la structure du sol est l'une des causes majeures de la minéralisation.

Des études ont montré que le pH du sol influence beaucoup la nitrification. Des études montrent que la nitrification augmente quand le pH du sol augmente (Li et al., 2007; Pietri et Brookes, 2008). En outre, il a été rapporté que la nitrification est faible à pH acide (Andrianarisoa, 2009) car les nitrifiants sont sensibles à l'acidité. Le pH optimum est de 6.6 à 8. Cependant, dans les sols ayant un pH supérieur à 7,5, un niveau toxique de NH<sub>3</sub> peut entraîner l'inhibition de l'activité des nitrobactères et l'accumulation de NO<sub>2</sub>. C'est le cas du système intensif de Saint-Raphaël où le pH du sol dépasse ce seuil de 7,5. Les pertes de l'azote par minéralisation peuvent être évaluées se l'indice ratio C/N de l'humus.

Dans nos travaux, une attention particulière a été portée sur le rapport C/N. Nous avons constaté que parmi les quatre systèmes étudiés, l'agroforesterie était aussi le

seul système ayant un rapport C/N compris en 10 et 12 dans les 30 premiers centimètres du sol. Inversement, nous avons vu que, malgré l'apport important d'engrais chimiques dans le système de culture intensif (SI), les concentrations en N total ont été impactées négativement. Faits marquants, les rapports C/N du sol ne sont pas influencés significativement par les 3 systèmes cultivés. Ces résultats convergent avec d'autres études réalisées en région tropicale. Grandière et al. (2007) et Some et al. (2015) ont indiqué que les rapports C/N des fractions du sol ne sont pas affectés par le mode de gestion des terres mais plutôt par les deux principaux indicateurs du statut organique du sol à savoir la teneur en azote en matière organique du sol (MOS). Toutefois, les valeurs de C/N sont très variées selon le type de sol à Saint-Raphaël. C'est le cas des RELEC et des Vertisols présentant respectivement des valeurs de C/N optimales de 11,86 et de 11,15. Les premiers présentent les plus fortes concentrations en COS et en N total (Tableau 3). Pour les Vertisols, cette valeur optimale de C/N s'explique par le fait que dans la fraction fine, quel que soit le traitement, la MOS bénéficie d'une protection physique provoquant une diminution de la biodégradabilité (Balesdent et al., 2000 ; Feller et Chenu, 2012, Barré et al., 2020). Inversement, les Gleysols, les Leptosols, les Haplic Cambisols et les Régosols présentent des valeurs de rapport C/N inférieures à la normale où ils varient de 7,2 à 8,98 (<10). Ces sols, positionnés majoritairement dans les versants, sont fortement exposés à la minéralisation. Ces rapports C/N faibles peuvent être expliqués par l'absence quasi totale d'apport de MOS durant ces 10 dernières années (Dorvil et al. 2013). Le pire, cette absence d'apport est associée à l'exportation des résidus de récolte dans les Gleysols (cas de Merlaine jusqu'à Porte 6). La faible teneur en MOS restante dans le complexe argilo-humique (MO récalcitrante) s'expose donc à la minéralisation si aucune mesure corrective n'est prise à court et à moyen terme.

## Conclusion

Nos résultats ont montré une grande variabilité de stockage de COS et d'azote total

dans les différents systèmes de culture et dans les différentes couches de sol. Ainsi, le stockage de C et d'azote dans le sol est étroitement lié aux mécanismes biotiques (via la plante à travers le système agroforestier) mais aussi aux mécanismes abiotiques assurés par les interactions organominérales du sol. Ainsi, nous avons constaté que les particules argilo-limoneuses jouent également un rôle prépondérant dans le stockage de la matière organique du sol. Le système agroforestier dominé par les RELEC enregistre la plus grande concentration en carbone organique et d'azote total. On déduit donc que les stocks de C à Saint-Raphaël sont le résultat de mécanismes interconnectés à fine échelle spatiale qui stabilisent (cas des systèmes SA et SSI) ou déstabilisent (SI et SSU) le carbone porté par la matière organique. L'effet dépressif de l'érosion des sols dans les versants et l'effet dépressif des rizières/cultures maraîchères sur la dégradation du stock de COS et d'azote total ont été aussi pris en compte. Dans les versants, la faible restitution organique associée à l'érosion hydrique des sols est à l'origine du déstockage de C. Bien que faible, la plus forte concentration en azote est emmagasinée dans les 10 premiers centimètres du sol. Une bonne gestion des terres en Haïti devra désormais permettre de promouvoir la restitution de la MO dans le sol en vue de maintenir la fertilité des sols via le changement de pratiques à usage constant favorables au stockage de COS et de l'azote total. Ce qui aura des retombés positifs sur l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, la réduction de l'érosion des sols, la conservation de la biodiversité et l'amélioration de la fertilité des sols voire l'amélioration de la sécurité alimentaire. Enfin, qui dit fertilité, dit plus de biomasse racinaire, plus d'exsudations racinaires, plus de résidus de récoltes et plus de matières organiques restituées au sol.

#### CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflit d'intérêts concernant cet article.

#### CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

Acquisition des fonds et gestion du projet: WD et HM. Conceptualisation/Méthodologie: WD, HM, JMT, WS et DA. Collecte, gestion et analyse des données: WD ; Supervision: HM, JMT. Validation : HM, JMT et WS ; Écriture/préparation de l'ébauche originale : WD. Écriture/Révision et édition: WD, HM, JMT, WS et DA.

#### REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont au MARNDR à travers les fonds de la BID, qui a financé cette étude, ainsi qu'aux organismes impliqués dans le comité de pilotage : Agrisud International, CHCL et L'IRD Eco&Sols, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier (Convention n° 308141-00). Le laboratoire des sols du CHCL est également remercié.

#### RÉFÉRENCES

- Adoum AA, Moulin P, Brossard M. 2017. Pioneering assessment of carbon stocks in polders soils developed in inter dune landscapes in a semi-arid climate, Lake Chad. *R. Geoscience*, **349**: 22–31. DOI: 10.1016/j.crte.2016.08.003.
- Andrianarisoa HS, Zellera B, Dupouey JL, Dambrinea E. 2009. Comparing indicators of N status of 50 beech stands (*Fagus sylvatica* L) in northeastern France. *Forest Ecology and Management*, **257**(11): 2241-2253. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.02.037.
- Annabi M, Le Bissonnais Y, Francou C, Le Villio-Poitrenaud M, Houot S. 2005. Utilisation de composts pour améliorer la stabilité structurale des sols limoneux. *Echo MO.*, **56** : 3-8.
- 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. *Etude et Gestion des Sols.*, **27**: 305-320.
- Betemariam EA, Vagen T G, Shephard K D, Winowiecki L. 2011. A Protocol for

- Measuring and Monitoring Soil Carbon Stocks in Agricultural. *Landscapes World Agroforestry Centre*, **11**: 19p. <https://orcid.org/0000-0001-5572-1284>.
- Booth, MS, Stark, MJ, Rastetter, E. 2005. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: a synthetic analysis of literature data. *Ecological Monographs*, **75** (2): 139-157. DOI:10.1890/04-0988.
- 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*, **37**: 23-37. hal-01173319f.
- Chenu C, Klumpp K, Bispo A, Angers D, Colnenne C, Metay A. 2020. Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations Agronomiques*, **37**: 23-37. Hal-01173319.
- Chenu C, Chotte J L, Luu P. 2022. Le stockage du carbone dans les sols. *Responsabilité et Environnement*, **105** : 72-77. DOI : 103917/re11050072.
- Courte A, Cialdella N, Muller A, Blanfort V, Bochu JL, Brossard M. 2020. 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**. DOI: 101051/cagri/2020019. 9 p.
- Dabin B, Brion J-C, Pelloux P, Regazzi C, Gavinelli E. 1967. Application des dosages automatiques à l'analyse des sols: essais effectués au laboratoire des Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM à Bondy avec l'autoanalyseur Technicon : 3ème partie. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie* **5** (3) : 257-286.
- Derrien D, Dignac MF, 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** : 193-223. fdi:010070578.
- Dorvil W, Clermont-Dauphin C, Chotte JL, Brossard M, Théodat JM, 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): 1643-16619. DOI: 10.4314/ijbcs.v17i4.28.
- Dougherty MC, Thevathasan NV, Gordon AM, Lee H, Kort J, 2007. Nitrate and E. Coli NAR analysis in tile drain effluent from a mixed tree intercrop and monocrop system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **131**(1-2): 77-84. DOI: 10.1016/j.agee.2008.09.011.
- Erktan A, Cécillon L, Rey F. 2013. Évolution des propriétés des sols de lits de ravines marneuses au cours de leur restauration écologique (Draix, France). pp. 555-564. Chapitre 41. DOI: 10.4000/books.irdeditions.24471.
- Erktan A, Cécillon L, Graf F, Roumet C, Legout C, Rey F. 2016. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems : combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. *Plant and Soil*, **398** :121-137. DOI: 10.1007/s11104-015-2647-6.
- FAO. 2017. *Carbone Organique du Sol: une Richesse Invisible*. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture : Rome, Italie.
- 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*, **10**: 187-211. DOI:101300/5755.
- Feller C, Chenu C, 2012 - Les interactions bio-organo-argileuses et la stabilisation du carbone dans le sol. *Étude et Gestion des Sols.*, **19**: 235-248.
- Fujisaki K, Chevallier T, Chapuis-Lardy L, Albrecht A, Razafimbelo T, Masse D, Badiane Ndour Y, Chotte JL. 2018. Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **259**: 147-158. DOI: 10.1016/j.agee.2017.12.008.

- GIEC. 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories National Greenhouse Gas Inventories Program Volume 4 Agriculture, forestry and other land use <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.
- GIEC. 2007. Bilan des changements climatiques, Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat GIEC (2007) (Rapport de Synthèse IV), 114 p, 2007.
- Grandière I, Razafimbelo T, Barthès B, Blanchart E, Louri J, Ferrer H, Chenu C, Wolf N, Albrecht A, Feller C. 2007. Distribution granulo-densimétrique de la matière organique dans un sol argileux sous semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres malgaches. *Etude et Gestion des Sols*, **14** (2): 117-133. (ird-04102819).
- Grinand C, Rajaonarivo A, Bernoux M, Pajot V, Brossard M. 2009. Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Etude de Gestion des Sols*, **16**: 23-33.
- Grosbellet C. 2008. Evolution et effet sur la structuration du sol de la matière organique apportée en grande quantité. Thèse de doctorat. *Université d'Angers, France.*, **1**: 210 p. (NNT : ). (tel-00487882).
- Gyssels G, Poesen J, Bochet E? Li Y. 2005. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water : a review. *Progress in Physical Geography*, **29** (2): 189-217. DOI: 10.1191/0309133305pp443ra.
- Heywood P, Turpin S. 2013. Variation in soil carbon stocks with texture and previous landuse in north-western NSW, Australia. *Sustainable Agriculture Research*, **2**: 124-133. DOI: 10.22004/ag.econ.231325.
- Hilbe JM. 2007. STATISTICA 7. *The American Statistician*, **61** (1): 91-94. DOI: 10.1198/000313007X172998.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC. 2021: Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yeleği O, Yu R, Zhou B (eds). Cambridge University Press. In Press.
- ISO 10390 2021. Soil, treated biowaste and sludge – Determination of pH. <https://www.iso.org/obp/ui/#home>.
- ISO 11265. 1994. Soil quality — Determination of the specific electrical conductivity. <https://www.iso.org/obp/ui/#home>.
- ISO 23400. 2021. Guidelines for the determination of organic carbon and nitrogen stocks and their variations in mineral soils at field scale.
- Jobbágy EG, Jackson RB. 2000. The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation. *Ecological Society of America*, **10**(2):253–268. DOI: 101890, 10, pp 423-436.
- Jose S, Gillespie AR, Pallardy SG. 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, **61**: 237–255. DOI: 10.1023/B:AGFO.0000029002.85273.9b.
- Jose S. 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, **76**: 1-10. DOI: 10.1007/s10457-009-9229-7.
- Jose S, Dollinger J. 2019. Silvopasture: a sustainable livestock production system. *Agroforestry Systems*, **93**: 1–9. DOI: 10.1007/s10457-019-00366-8.
- Kim DG, Isaac ME. 2022. Nitrogen dynamics in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **42** (60): 18p. DOI : 101007/s13593-022-00791-7.
- Le Bissonnais Y, Cerdan O, Lecomte V, Benkhadra H, Souchère V, Martin P.

2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *CATENA*, **62** (2-3): 111-124. DOI: 10.1016/j.catena.2005.05.001.
- Li XG, Rengel Z, Mapfumo E, Singh B. 2007. Increase in pH stimulates mineralization of 'native' organic carbon and nitrogen in naturally salt-affected sandy. *Soils Plant and Soil*, **290**: 269-282. DOI: 10.1007/s11104-006-9158-4.
- Li Y, Duan X, Li Y, Li Y, Zhang L. 2021. Interactive effects of land use and soil erosion on soil organic carbon in the dry-hot valley region of southern China. *CATENA*, **201**(155): 10p. DOI: 101016/jcatena2021105187.
- Marchão RL, Becquer T, Brunet D, Balbino LC, Vilela L, Brossard M. 2015. Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop–livestock management systems. *Soil & Tillage Research.*, **103**: 442–450. DOI: 101016/jstill200811002.
- Martins MDR et Angers DA. 2015. Different plant types for different soil ecosystem services. *Geoderma.*, **237-238** : 266-269. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.09.013.
- Mulia R, Dupraz C. 2005. Unusual fine root distributions of two deciduous tree species observed in Southern France: what consequences for root dynamics modelling? *Plant and Soil.*, **281**: 71-85.
- Nair PKR, Nair VD, Kumar BM, Haile SG. 2009. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Environmental Science & Policy*, **12**: 1099–1111 DOI: 101016/jenvsci200901010.
- Pellerin S, Bamière L, Savani I, Rechauchère, Launay C, Martin R, Schiavo M, Angers D. 2021. *Stocker du Carbone dans les Sols Français. Quel Potentiel au Regard de L'objectif 4 pour 1000 et à Quel Coût?* Éditions Quæ: Versailles; 232 p. DOI: 10.35690/978-2-7592-3149-2.
- Pietri JCA, Brookes PC. 2008. Nitrogen mineralization along a pH gradient of a silty loam UK soil. *Soil Biology & Biochemistry*, **40**: 797-802. DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.10.014.
- Rasse DP, Rumpel C, Dignac MF. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. *Plant and Soil*, **269**: 341-356. DOI: 101007/s11104-004-0907-y.
- Some D, Hien E, Assigbetse K, Drevon JJ, Masse D. 2015. Dynamique des compartiments du carbone et de l'azote dans le sol cultivé en niébé et sorgho dans le système zai en zone Nord soudanienne du Burkina Faso. *Int J Biol Chem Sci.*, **9**(2): 954-969. DOI: 104314/ijbcsv9i232.
- Tsonkova P, Quinkensteina A, Böhm C. 2014. Ecosystem services assessment tool for agroforestry (ESAT-A): An approach to assess selected ecosystem services provided by alley cropping systems. *Ecological Indicators*, **45**: 285-299. DOI: 101016/j.ecolind201404024.
- Wang S, Zuo Q, Cao Q, Wang P, Yang B, Zhao S, Cao R, Chen M. 2021. Acceleration of soil N<sub>2</sub>O flux and nitrogen transformation during tropical secondary forest succession after slash-and-burn agriculture. *Soil Till Res*, **208**: 104868. DOI: 101016/jstill2020104868.
- Wu QS, Cao MQ, Zou YN, He XH. 2014. Direct and indirect effects of glomalin, mycorrhizal hyphae, and roots on aggregate stability in rhizosphere of trifoliate orange. *Scientific Reports*, **4**: 5823. DOI:10.1038/srep05823. 8p.