



IRD Eco&Sols, CIRAD,
INRAE, Institut Agro,
Montpellier, France

UNIVERSITÉ D'ÉTAT D'HAÏTI

Direction des Études Post-Graduées

Thèse

En vue de l'obtention du grade de
Docteur de l'Université d'État d'Haïti

Discipline : Sciences pures et appliquées

Spécialité : Sciences du sol

Présentée et soutenue publiquement le 18 mars 2024 par :

Weldenson DORVIL

**La gestion durable des sols pour stocker du carbone et limiter le changement climatique
en Haïti : les mécanismes, les systèmes de production et pratiques agricoles**

Devant le jury composé de :

Martial BERNOUX
Sophie DEVIENNE
Claudel NOEL
Bénédictine PAUL
Michel BROSSARD
Jean Marie THEODAT

Directeur de recherche, IRD
Chercheuse d'AgroParisTech
Directeur de recherche, UEH
Directeur de recherche, uniQ
Directeur de recherche, IRD
Directeur de recherche, UEH

Examineur
Examinatrice
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de Thèse
Co-encadrant de Thèse

IRD, UMR Eco&Sols- Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des Sols & Agroécosystèmes,
Place Viala (Bat 12) - F-34060 Montpellier cedex 2 – France.

REMERCIEMENTS

Il me paraît impossible de remercier tous ceux qui ont contribué à ce travail, fruit de nombreuses collaborations, je m'excuse donc d'éventuels oublis.

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail. Merci donc aux rapporteurs, Bénédicte PAUL et Claudel NOËL, ainsi qu'aux examinateurs, Martial BERNOUX et Sophie DEVIENNE.

Nous remercions vivement la Revue Étude et Gestion des Sols en particulier (EGS-AFES), les deux relecteurs ainsi que Dominique ARROUAYS pour leurs critiques constructives dans notre article.

Nous remercions également la Revue The International Journal of Biological and Chemical Sciences (IJBCS) en particulier, les relecteurs ainsi que Donatien GATSING.

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse a été réalisé à l'IRD Eco&Sols, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France. Il s'agit d'une thèse de doctorat de l'Université d'État d'Haïti. Il a bénéficié d'importantes collaborations avec le consortium constitué du Campus Henry Christophe de Limonade, l'IRD et Agrisud International. Sans oublier le Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural (MARNDR), qui a commandité le « Programme de Recherche-Formation-Vulgarisation sur l'agriculture adaptée aux changements climatiques » à Saint-Raphaël. Ce grand chantier est réalisé à travers ce projet avec pour vocation « SOL pour la sécurité alimentaire et le climat en Haïti ».

Mes remerciements vont en premier lieu à mes trois co-directeurs de thèse : Michel BROSSARD, Jean Luc CHOTTE et Jean Marie THEODAT. Ils ont su trouver le temps pour m'accompagner durant ces trois années. Leur réactivité et leur rigueur m'ont largement aidé à tracer mon sillon.

Michel BROSSARD, encadreur principal, est remercié d'une façon spéciale de m'avoir fait confiance avec d'une part, ma formation d'ingénieur Agronome et, d'autre part avec ma formation en Biodiversité tropicale à travers laquelle mon mémoire a été réalisé sur le Carbone (Biomasse végétale en Guadeloupe). Durant ces trois années il a su m'encadrer et me conseiller dans l'organisation de la thèse et dans mes réflexions. Les formations sur le terrain m'ont été également très utiles.

Je remercie Cathy Clermont DAUPHIN de m'avoir accueilli comme compatriote, qui m'a beaucoup aidé. Elle m'a accompagné dans tous mes projets de recherche à tel point mon premier article publié lui est dédié spécialement. Je lui remercie également pour ses bons conseils et son hospitalité. Ses formations en statistiques m'ont été très précieuses.

Sur ce même angle, une pensée spéciale à madame Rhino BEATRICE pour ces conseils.

J'exprime toute ma reconnaissance à Jean Luc Chotte pour pour ces critiques constructives.

Je remercie Nancy Murielle RAKOTONDRAZAFY pour m'avoir accueilli au laboratoire de l'UMR Eco&Sols et pour ses encadrements dans les différentes manipulations.

Un remerciement spécial à Jean Mary THEODAT pour m'avoir accueilli à son laboratoire de Recherche « Urbalab-UrbaTerre » et qui a rendu possible ce travail de recherche. Je lui remercie aussi pour m'avoir accepté comme Co-encadrant de thèse.

Je remercie toute l'Équipe de BIOFINCTOOL : Nancy Murielle RAKOTONDRAZAFY, Alexis THOUMAZEAU, Alain BRAUMAN et Jim FELIX-FAURE.

Le Rectorat de l'UEH est remercié également.

Je remercie Blair CHERY pour son accueil au sein de l'école doctorale de l'Université d'État d'Haïti. Il était toujours prêt à me répondre pour toutes informations.

Le Campus Henry Christophe de Limonade à travers le Conseil de Gestion est remercié pour avoir placé sa confiance en moi, sans oublier le staff professoral et mes 5 étudiants stagiaires qui ont grandement contribué dans la collecte des données sur le terrain et dans les analyses de labo en particulier, Irva, Donald et Ronaldo.

Tout le staff de l'UMR Eco&Sol est remercié en particulier Mr L. Cournac, Mr F. Meddaci et Mme I. Sciacco pour leur hospitalité mais également à Bernard, Gabrielle, Damien, Tiphaine CHEVALLIER, etc.

Je remercie le Gouvernement français via son Ambassade en Haïti qui m'a livré toujours le visa pour réaliser les mobilités, clés de cette formation.

Tout le staff d'Agrisud international : Sylvain Desfontaines, Sylvain Berton et Didier Gensous ; Hérauld Museau, Genève Dérosin, Christine Celestin et Lazare Paul Iland.

Les 90 agriculteurs, sans lesquels ce travail de recherche ne serait pas possible, sont remerciés.

Une pensée spéciale pour ma grande Famille : mon Épouse, mes deux enfants, mes parents, mes frères et sœurs qui m'ont particulièrement soutenu durant ce grand parcours académique.

Enfin, Mes remerciements vont à l'égard de mes cinq stagiaires en l'occurrence, Irva Delva, Donald André, Ronaldo Jean, Emmanuel Raphaël Thélusma et Dachka Dorvil. Leurs contributions ont été très remarquables (collecte des données sur le terrain, analyses de sols au laboratoire du CHCL).

RÉSUMÉ

Comme beaucoup de sols positionnés en pente en Haïti, les sols de montagnes de Saint-Raphaël sont pauvres en matière organique et le rôle de cette dernière dans la fertilité du sol est considérable. Son piégeage dans le sol est une stratégie fondamentale pour atténuer le changement climatique, et peut également être considéré comme une mesure d'adaptation et de résilience. En revanche, l'intensification de la production agricole par l'usage excessif d'engrais azotés aux effets acidifiants et l'adoption des pratiques de brûlis sont susceptibles de diminuer considérablement les stocks de carbone organique (COS) dans le plateau irrigué. Ce qui peut conduire à un seuil critique au-dessous duquel de graves difficultés risquent d'apparaître. Notre objectif a été d'évaluer l'effet des différents systèmes de culture sur le stockage de carbone des sols à Saint-Raphaël et de comprendre en quoi l'optimisation du stockage de carbone améliore la fertilité des sols. Il s'agissait d'une étude à caractère très original et très peu réalisée en Haïti, de type synchronique, pour essayer de quantifier les effets des différentes pratiques agricoles et des systèmes de culture sur les stocks de COS. Ce qui a nécessité d'inventorier au préalable des pratiques agricoles adaptées aux conditions locales qui augmentent les flux d'entrée de C dans les sols et/ou qui en diminuent les flux de sortie. Il s'agissait aussi d'établir le lien entre le stockage de C et la production agricole durable en fournissant des estimations des stocks de carbone dans les différentes profondeurs du sol. Nous avons donc entrepris de mesurer dans un premier temps les stocks organiques au niveau de 78 parcelles paysannes jusqu'à 50 cm de profondeur du sol. Des mesures de stocks de COS jusqu'à 100 cm de profondeur au niveau de 90 parcelles ont été également effectuées. Cet inventaire a montré une variabilité verticale importante des stocks de COS qui reflète en partie les effets de la profondeur de sol considérée qui traduit la diversité des sols observés. Les valeurs moyennes des stocks de COS des couches 0-30 cm, 0-50 cm et 0-100 cm étaient respectivement de $97,5 \pm 45,7$ MgC.ha⁻¹, de $132,7 \pm 60,1$ MgC.ha⁻¹ et de $174 \pm 71,08$ MgC.ha⁻¹. Le plus élevé et le plus faible stock de C à 0-100 cm ont été enregistrés respectivement dans le système agroforestier (SA) ($196,44$ MgC. ha⁻¹) et le système de pâturage (SSU) ($128,55$ MgC. ha⁻¹). Les stocks de C ont varié de $80,57$ MgC. ha⁻¹ pour les Haplic Cambisols (Eutric ou Calcaric) à 203 MgC. ha⁻¹ pour les Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols (RELEC). Si nous tenons compte de la position des parcelles dans le paysage, les stocks de C ont varié de $112,0 \pm 37,0$ MgC. ha⁻¹ dans les versants à $150,2 \pm 40,1$ MgC. ha⁻¹ dans les vallées dans la couche 0-50 cm. Il faut souligner l'effet non significatif des stocks organiques dans l'horizon de surface (0-30 cm) entre les systèmes de culture. Toutefois, un effet du type de sol, de la profondeur du sol et de la topographie sur l'expression des stocks

a été constaté. Si on se base sur les stocks verticaux, la couche 0-50 cm du sol emmagasine plus de 65% des stocks totaux. La nature carbonatée des sols est prégnante et a été explorée pour une meilleure compréhension de l'évolution des stocks de COS de cette région fortement soumise à une agriculture en voie d'intensification. Nos résultats ont montré que les pratiques agroforestières 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. On peut penser qu'une boucle vertueuse s'est mise en place où la restitution des résidus a permis l'amélioration des stocks de C en SA mais aussi l'amélioration de la fertilité de ces sols. En conséquence, qui dit fertilité, dit plus de biomasse racinaire, plus d'exsudations racinaires, plus de résidus de culture et plus de matières organiques restituées au sol.

Mot-clés : Changement climatique, Qualité des sols, Changement d'usage des terres, Fertilité du sol, mécanismes de stabilisation, pratiques agricoles, Matière organique, Profondeur du sol, Topographie, Types de sol, Système de culture.

SUMMARY

Like many sloping soils in Haïti, the mountain soils of Saint-Raphaël are low in organic matter, which plays a considerable role in soil fertility. Its trapping in the ground is a fundamental strategy for mitigating climate change, and can also be considered as a measure of adaptation and resilience. On the other hand, the intensification of agricultural production through the excessive use of nitrogen fertilizers with acidifying effects and the adoption of burning practices are likely to considerably reduce the soil organic carbon stocks (SOC) in the irrigated plateau. This can lead to a critical threshold below which serious difficulties are likely to appear. Our objective was to evaluate the effect of different cropping systems on soil carbon storage in Saint-Raphaël. This was a study of a very original nature and very little carried out in Haïti, of a synchronic type, to try to quantify the effects of different agricultural practices and cropping systems on the stock of SOC. This required first inventorying agricultural practices adapted to local conditions which increase the input flows of C into the soil and/or reduce the output flows. The aim was to establish the link between C storage and sustainable agricultural production by providing estimates of carbon stocks in the different depths of the soil. We therefore began to measure organic stocks in 78 farmer plots up to 50 cm deep in the soil. Measurements of organic stocks up to 100 cm deep at 90 plots were also carried out. This inventory showed significant vertical variability in SOC stocks which partly reflects the effects of the soil depth considered which reflects the diversity of soils observed during this inventory. The highest and lowest C stock were recorded respectively in the agroforestry system (SA) ($196.44 \text{ MgC. ha}^{-1}$) and the pasture system (SSU) ($128.55 \text{ MgC. ha}^{-1}$) following an average stock of $174 \pm 71.8 \text{ MgC. ha}^{-1}$. C stocks varied by $80.57 \text{ MgC. ha}^{-1}$ for Haplic Cambisols (Eutric or Calcaric) at 203 MgC. ha^{-1} for Rendzic Leptosols and Epileptic Cambisols (RELEC). If we take into account the position of the plots in the landscape, C stocks varied from $112.0 \pm 37.0 \text{ MgC. ha}^{-1}$ in the slopes to 150.2 ± 40.1 in the valleys in the layer 0-50 cm following an average stock of $132.7 \pm 60.1 \text{ MgC. ha}^{-1}$. This was a very original study in Haïti, of a synchronic type, to try to quantify the effects of different agricultural practices on the C stock. Unlike the permanent grazing system (SSU), the organic stocks of the soil subject to agroforestry (SA) are higher. An average increase in SOC amounts to 23% and 28% respectively in the 0-30 and 0-50 cm layers. It should be emphasized the non-significant effect of organic stocks in the surface horizon (0-30 cm) between the crop systems. However, an effect of the type of soil, the depth of the soil and the topography on the expression of stocks was observed. If we are based on the vertical stocks, the layer 0-50 cm of the soil stores more than 65% of the total stocks. The carbonated nature of

the soils is important and has been explored for a better understanding of the evolution of the COS stocks of this region strongly subjected to agriculture in the process of intensification. Our results showed that agroforestry practices restore the MOS better because of a better plant cover, an increase in carbon input by the trees, and a better root colonization in the first 50 centimeters of the soil. We can think that a virtuous circle has been put in place where the restitution of residues has allowed the improvement of C and SA stocks but also the improvement of the fertility of these soils. As a result, fertility means more root biomass, more root exudations, more crop residues and more organic matter returned to the soil.

Keywords: Climate change, Soil quality, Land use change, Soil fertility, stabilization mechanisms, agricultural practices, Organic matter, Soil depth, Topography, Soil types, Cultivation system.

TABLES DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	V
SUMMARY.....	VII
TABLES DES MATIÈRES.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
ACRONYMES.....	XVII
CHAPITRE I : INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1. CONTEXTE GENERAL DE LA THESE.....	2
2. PROBLEMATIQUE ET ORGANISATION DE LA THESE.....	4
1. CONTEXTE SCIENTIFIQUE SUR LE SOL.....	8
1.1. DEFINITION DU SOL.....	8
1.2. COMPOSITION DU SOL.....	9
1.3. FONCTIONS DES SOLS.....	9
1.4. MENACES SUR LES FONCTIONS DES SOLS EN CONTEXTE HAÏTIEN: EROSION ET DEGRADATION DES TERRES.....	12
1.4.1. Erosion des sols en Haïti.....	12
1.4.2. Dégradation des sols à la suite de la déforestation et des mauvaises pratiques agricoles en Haïti, cas de Saint-Raphaël.....	13
1.4.3. Restauration écologique des bassins versants pour la résilience des écosystèmes d'Haïti : Quelle stratégie ?.....	17
2. LE CARBONE ORGANIQUE DES SOLS (COS) : DU CONTEXTE GLOBAL AU CONTEXTE HAÏTIEN	19
2.1. CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	19
2.2. EMISSIONS GLOBALES DES GES : CAUSES, SOURCES ET MECANISMES.....	21
2.3. LE CARBONE DES SOLS AU CŒUR DES NEGOCIATIONS INTERNATIONALES : L'INITIATIVE 4 POUR 1000 DES SOLS POUR LA SECURITE ALIMENTAIRE ET LE CLIMAT.....	22
2.4. QUELLES PRATIQUES POUR STOCKER ANNUELLEMENT DANS LE SOL LES 4,3 GT DE C DE L'ATMOSPHERE ?.....	23
2.5. LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL (MOS), MOTEUR DE LA QUALITE ET DE LA SANTE DU SOL :.....	25
2.5.1. Répartition de la MOS :.....	25
2.5.2. Rôles de la MO dans le sol.....	26
2.6. LE CARBONE ORGANIQUE DES SOLS (COS) : CONSTITUANT PRINCIPAL DE LA MOS.....	27
2.6.1. Rôles du carbone organique du sol (COS).....	29
2.6.2. Mécanismes de stabilisation du COS dans le sol.....	31
2.6.3. Facteurs influençant la distribution du carbone dans les sols.....	32
2.7. DES PRATIQUES CONCILIANTES FERTILITES DES SOLS ET ENVIRONNEMENT.....	35
CHAPITRE II : CADRE D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE.....	37
1. MILIEU BIOPHYSIQUE.....	38
1.1 PARTICULARITES DU MILIEU PHYSIQUE DE SAINT-RAPHAËL.....	38
1.1.1. Situation géographique de l'étude.....	38
1.1.2. Contexte bioclimatique.....	39
2. MATERIELS UTILISES.....	47
2.1. MATERIELS MATERIELS DE TERRAIN.....	47
2.2. MATERIELS DE LABORATOIRE.....	48

3. STRATEGIE D’ECHANTILLONNAGE ET METHODES ANALYTIQUES.....	48
3.1. METHODES DE TERRAIN	48
3.1.1. <i>Échantillonnage</i>	48
3.1.2. <i>Mesure de la densité apparente</i>	50
3.2. METHODES D’ETUDE AU LABORATOIRE.....	52
3.2.1. <i>Dosage de la teneur en carbone organique total (COT) et d’azote total (Nt) par la méthode de CHN</i>	52
3.2.2. <i>Mesure des stocks de COS des couches 0-30 cm, 0-50 cm et 0-100 cm</i>	53
3.2.3. <i>Autres paramètres physico-chimiques analysés</i>	54
3.2.4. <i>Analyses statistiques</i>	54
CHAPITRE III : CARACTERES MORPHOLOGIQUES DES SOLS ÉCHANTILLONNÉS	56
1. INTRODUCTION.....	57
2. DESCRIPTION DES PROFILS PEDOLOGIQUES A SAINT-RAPHAËL.....	57
2.1. LE PROFIL D’UN SOL LOCALISE A HAUTEUR DE PENTE : CAS D’UN RENDZIC LEPTOSOL	57
2.2. LE PROFIL D’UN SOL LOCALISE EN VALLEE SOUS L’AGROFORESTERIE : CAS D’UN CALCIC CAMBISOL	60
2.3. LE PROFIL DE SOL LOCALISE A MI PENTE : CAS D’UN RENDZIC LEPTOSOL.....	63
2.4. LE PROFIL DE SOL LOCALISE AU PIEDMONT SOUS PATURAGE : CAS D’UN CAMBISOL.	66
2.5. LE PROFIL DE SOL LOCALISE AU PLATEAU IRRIGUE SOUMIS AUX PRATIQUES INTENSIVES (CULTURES MARAICHÈRES ET DE RIZ) : CAS DES VERTISOLS	68
2.6. LE PROFIL DU SOL LOCALISE AU PLATEAU NON IRRIGUE SOUMIS AUX PRATIQUES SEMI-INTENSIVES (CULTURES ASSOCIÉES, PLAINE DE SANYAGO) : CAS DES VERTISOLS	71
2.7. LE PROFIL DE SOL LOCALISE AU PLATEAU NON IRRIGUE SOUMIS A L’USAGE SEMI-INTENSIF AVEC LA VALORISATION DES ROTATIONS DE LEGUMINEUSE (PLAINE DE BOUYARA) : CAS D’UN CALCIC-CAMBISOL	74
2.8. LE PROFIL DU SOL LOCALISE EN VALLEE SOUS AGROFORESTERIE (TRES DENSE) A BASE DE CACAoyer (AFC) : CAS D’UN RELEC	77
3. CONCLUSION.....	81
CHAPITRE IV : LEGUMINEUSES, AGROFORESTERIE, LABOUR ET PATURAGE : LES DETERMINANTS DE LA DIVERSITE DES SYSTEMES DE CULTURE A SAINT-RAPHAËL, HAÏTI.....	83
1. INTRODUCTION.....	86
2. METHODES.....	87
2.1. ZONE D’ETUDE	87
2.1. CHOIX DES PARCELLES D’ENQUETES	90
2.2. DESCRIPTION DES SYSTEMES DE CULTURE (SC)	90
2.3. CONNAISSANCES ET PERCEPTIONS DE LA GESTION DES SOLS PAR LES AGRICULTEURS.....	90
2.4. ANALYSES STATISTIQUES POUR CETTE ETUDE	90
3. RESULTATS	91
3.1. TYPLOGIE STATISTIQUE ET ANALYSES DES SYSTEMES DE CULTURE (SC).....	91
3.2. DESCRIPTION DES VARIABLES DE CARACTERISATION DES SYSTEMES DE CULTURE.....	96
3.3. PERCEPTION DES AGRICULTEURS A L’EGARD DES SOLS	98
4. DISCUSSION.....	99
5. CONCLUSION.....	102
CHAPITRE V : STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE DE SOLS EN HAÏTI : ANALYSE DE L’EFFET DE SYSTEMES DE CULTURE DE LA COMMUNE DE SAINT-RAPHAËL, NORD D’HAÏTI.....	103

1. INTRODUCTION	106
2. RESULTATS	108
2.1. PRINCIPALES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS	108
2.2. LES DENSITES APPARENTES (DA).....	109
2.3. VARIATION DE LA TENEUR EN CARBONE ORGANIQUE TOTAL (COT) EN FONCTION DES SYSTEMES DE CULTURE ET DE LA PROFONDEUR	110
2.4. STOCK DE CARBONE ORGANIQUE (COS) PAR TYPE DE SOL.....	111
2.5. LES STOCKS DE COS SELON LA PROFONDEUR, LES SYSTEMES DE CULTURE ET LA TOPOGRAPHIE	113
3. DISCUSSION.....	114
4. CONCLUSION	119
1. INTRODUCTION	123
2. RESULTATS	124
2.1 DISTRIBUTION VERTICALE DES CONCENTRATIONS EN COT ET EN N TOTAL	124
2.2. VARIATION DE LA TENEUR EN CARBONE TOTAL ET D'AZOTE TOTAL EN FONCTION DES SYSTEMES DE CULTURE	126
2.3. DISTRIBUTION DES STOCKS DE CARBONE ET DE L'AZOTE TOTAL PAR TYPE DE SOL	127
2.4. ESTIMATION DES STOCKS DE COS SELON LES SYSTEMES DE CULTURE ET LA PROFONDEUR	127
2.5. DISTRIBUTION SPATIALE DES STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE (COS) A SAINT-RAPHAËL	129
2.6. ANALYSES DES LIENS ENTRE LA FERTILITE ET LE CARBONE DU SOL ASSOCIANT LA TEXTURE FINE DU SOL	130
2.7. MODELISATION DE LA VARIABILITE VERTICALE DU CARBONE ET D'AZOTE TOTAL.	131
3. DISCUSSION.....	132
4. CONCLUSION.....	137
DISCUSSION GÉNÉRALE, PERSPECTIVES ET CONCLUSION.....	138
1. CARBONE-FERTILITE POUR LES ACTEURS	139
2. C ORGANIQUE DU SOL A SAINT-RAPHAËL ET SON IMPLICATION ENVIRONNEMENTALE	141
3. ÉTAT DES STOCKS ORGANIQUES A SAINT-RAPHAËL : BILAN	142
4. INFLUENCE DES SYSTEMES DE PRODUCTION AGRICOLES SUR LES PROPRIETES DU SOL A SAINT RAPHAËL.....	145
4.1. CAS DES SYSTEMES DE PRODUCTION A USAGE INTENSIF (A IMPACTS FORTS)	145
4.2. CAS DES PRATIQUES DURABLES (A FAIBLES IMPACTS) : AGROFORESTERIE, CULTURES INTERCALAIRES, ROTATION DES CULTURES, JACHERES ET AGRO-ECOLOGIE.	147
5. IMPLICATION DU COS EN TERMES DE POLITIQUES PUBLIQUES EN HAÏTI (ATTENUATION ET ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN HAÏTI).....	148
6. ALTERNATIVES TECHNIQUES DE GESTION DES STOCKS DE COS ET D'AZOTE TOTAL DANS LES SOLS A SAINT-RAPHAËL : TENDANCES FUTURES	149
7. AUTRES PERSPECTIVES.....	151
CONCLUSION GENERALE.....	154
ANNEXES.....	187

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Démarche méthodologique de la thèse doctorale	6
Figure 2 : Composants organiques et inorganiques du sol (adaptée selon MAAARO (2018))......	9
Figure 3 : Schéma conceptuel positionnant le sol comme un capital naturel générant des services écosystémiques en réponse aux besoins humains(Le Roux et al. 2008 ; Minasny et al., 2017 ; Baptist et al., 2018 ; Thoumazeau et al., 2019 ; Monfort et al., 2020 ; Eglin et al., 2021 ; Calvaruso et al., 2021 ; FAO, 2015).....	10
Figure 4 : Schéma relatif aux conséquences des changements climatiques sur la production agricole à Saint-Raphaël (adopté de Smolikowski, 1993).	13
Figure 5 : Schématisation de la stratégie d'ingénierie écologique pour la restauration des ravines érodées et des versants en Haïti.....	18
Figure 6 : Historique des changements de température à l'échelle planétaire et causes du réchauffement récent.....	20
Figure 7 : Conception dans la pratique de l'initiative de séquestration du carbone 4 pour 1000 dans le sol (adaptée de Minasny et al., 2017).....	22
Figure 8 : Flux annuel sur taille du réservoir des sols (Adaptée d'IPCC, 2014) en lien avec le 4%.24	
Figure 9: MO des sols agricoles : proportion totale dans le sol en concentration et formes (adapté de Van Camp et al., 2004).....	26
Figure 10 : Rôle de la matière organique du sol dans le compartiment sol, schémas adapté d'Adoum, 2016.....	27
Figure 11 : Carte de stocks de COS de l'Amérique Latine à 0-30 cm du sol selon Gardi et al. (2014).	28
Figure 12 : Facteurs, processus et effets des pratiques conciliant les arbres, la diversité de culture et les animaux sur le potentiel de séquestration du carbone (adapté de Nair et al., 2009).	31
Figure 13: Shémas conceptuel des différences de traits fonctionnels et d'associations symbiotiques entre différentes espèces végétales influençant la stabilisation de la matière organique du sol. Adapté de Freshet et al. (2018).....	34
Figure 14 : Dynamiques des MOS du sol et volants d'action pour augmenter les stocks de Carbone dans le sol (adaptée de Chenu et al., 2022).....	36
Figure 15 : Localisation géographique de la commune de Saint-Raphaël	38
Figure 16 : Pluviométrie moyenne annuelle de la commune de Saint-Raphaël (2002-2021).	39
Figure 17 : Contexte végétal de la Commune de Saint-Raphaël: (a) et (b) Végétation naturelle/pâturage permanent ; (c) Montagne dégradée (depuis 25 ans selon les agriculteurs) ; d) plateau irrigué soumis aux cultures du riz et des maraichères ; (e), (f), (g) Agroforesterie (tout type confondu) ; h) et i) plateau non irrigué soumis aux pratiques semi-intensives (association pois congo, haricot, gombo, maïs).42	
Figure 18 : Cartographie des principales lithologies de la commune de Saint-Raphaël	43
Figure 19 : Carte du réseau hydrographique de Saint-Raphaël	44
Figure 20 : Typologie des sols de la commune de Saint-Raphaël.....	45
Figure 21 : Distribution des systèmes de cultures et localisation des sites inventoriés.....	47
Figure 22 : Prélèvement des sols par la méthode de composites.....	50
Figure 23 : Prélèvements des sols pour la mesure de la densité apparente : a) méthode à l'eau ; b) méthode de cylindre	51
Figure 24 : Décarbonatation au calcimètre Bernard pour la mesure de la teneur en carbone organique total (COT) par la méthode CHCN (Laboratoire de l'UMR Eco&Sol, Montpellier) : a) Calcimètre Bernard ; b) et c) : préparation des échantillons de sol de la solution.....	53
Figure 25 : Décarbonatation des sols pour le dosage de la MOS par la méthode Walkley & Black (Laboratoire de Sol à CHCL, Haïti) : a) attaque des échantillons de sol à l'acide phosphorique 85% ; b) séchage à 60 °C des échantillons à l'étuve après décarbonatation.	54

Figure 26 : Rendzic Leptosol situé à hauteur de pente : a) Prise d'échantillons pour mesure de densité apparente et face échantillonnée pour la description globale du profil et b) fosse pédologique et son environnement.....	59
Figure 27 : RELEC localisé en vallée soumis à l'agroforesterie : a) vue globale de la fosse pédologique ; b) face échantillonnée pour les caractéristiques globales et vue globale de la taille des agrégats/ prise d'échantillons pour mesure de densité apparente et face échantillonnée pour la description globale du profil et c) environnement du profil.	62
Figure 28: Leptosol localisé à mi pente soumis au pâturage a) vue globale de la fosse pédologique ; b) face échantillonnée pour les caractéristiques globales, prise d'échantillons pour mesure de densité apparente et face échantillonnée pour la description globale du profil et c) environnement du profil.	65
Figure 29 : Leptosol localisé au piedmont soumis au Pâturage. a) face échantillonnée pour les caractéristiques globales, prise d'échantillons pour mesure de densité apparente b) environnement du profil.....	68
Figure 30 : Vertisol localisé au périmètre irrigué soumis aux pratiques intensives a) vue globale de la fosse pédologique ; b) face échantillonnée pour les caractéristiques globales, prise d'échantillons pour mesure de densité apparente ; c) et d) environnement du profil.....	71
Figure 31 : Vertisol localisé au plateau non irrigué soumis aux pratiques non intensives (Sanyago) a) vue globale de la fosse pédologique ; b) face échantillonnée pour les caractéristiques globales, prise d'échantillons pour mesure de densité apparente.....	74
Figure 32 : Vertisol localisé au plateau non irrigué soumis aux pratiques semi-intensives (Bouyara) : a) vue globale de la fosse pédologique pour la description globale du profil ; b) prise d'échantillons pour mesure de densité apparente ; c) et d) environnement du profil.....	77
Figure 33 : Profil localisé en vallée soumis aux pratiques agroforestières de type AFC: a) vue globale de la fosse pédologique pour la description globale du profil et mesure de densité apparente ; b) Vue de l'horizon humifère en dessous duquel emmagasinent les macroagrégats stables en surface de 1 à 2 cm ; c) environnement du profil.....	81
Figure 34 : Distribution des quatre sections administratives de Saint Raphaël et cartographie des différentes classes de pente : très faibles < 6%, faibles 6-12%, moyennes 13-20%, fortes 20-50%, très fortes > 50% (CHCL et al., 2020).	88
Figure 35 : ACM des variables de caractérisation des systèmes culture. Fert : Fertilisation ; Jach : Durée de la jachère ; Pest : Pesticide ; Arbre : nombre d'arbres dans la parcelle ; MO : apport de matière organique.....	94
Figure 36 : Introduction des variables supplémentaires sur le plan de l'ACM. a : Topographie ; b : Section communale ; c : Classe de sol et d : Irrigation.....	95
Figure 37 : Histogramme de distribution des valeurs de densité apparente (D_a en $g\ cm^{-3}$) de la couche 0-50 cm des 78 parcelles (a) ; distribution des D_a avec les deux méthodes de mesure (b) ; comparaison des moyennes des valeurs de D_a par système de culture de la couche 0-30 cm (c).....	110
Figure 38 : Concentrations en COT des couches 0-50 cm de sol, a) histogramme de distribution ; b) valeurs dans les quatre systèmes de culture.	111
Figure 39 : Histogramme de distribution des stocks de carbone organique ($MgC\cdot ha^{-1}$) de la couche 0-50 cm des sols des 78 parcelles.	112
Figure 40 : 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.....	118
Figure 41 : Distribution verticale des teneurs en carbone et en azote total à 0-100 cm.....	125
Figure 42 : Distribution verticale des teneurs en carbone en fonction des types de sol.....	125
Figure 43 : 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.....	126

Figure 44 : Histogrammes de distribution des stocks de COS de la couche 0-100 cm en fonction des systèmes de culture (A) et statistique descriptive des stocks de COS (B).	128
Figure 45 : Spatialisation du stock de COS à 0-50 cm.	130
Figure 46 : Influence des systèmes de culture sur le rapport COT/argile à 0-50 cm.	131
Figure 47 : Courbes logarithmiques relatives à la prédiction de la variabilité verticale des concentrations en carbone (A) et d'azote totale (B).	132
Figure 48 : La répartition verticale sous forme de schémas de l'évolution des stocks de COS pour les différents systèmes de culture.	145
Figure 49 : Vue de la situation controversée du secteur agricole à Saint-Raphaël : a) pâturage bovin observé durant les courtes périodes d'interculture de 30 à 45 jours et b) Pratiques de brûlis généralisées des résidus de culture sur le périmètre après récolte.	147
Figure 50 : Vue de deux couverts de pois-congo à Saint-Raphaël : a) variété Ti Bòkò non-photopériodique en système intensif en phase de montaison (60 cm de hauteur) ; b) variété locale photopériodique en phase de croissance végétative (1,20 cm).....	150

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Paramètres retenus pour évaluer l'état des fonctions du sol (FAO et ITPS, 2015 ; Calvaruso et al., 2019).....	11
Tableau 2 : Illustration des différents services fournis par le sol.....	11
Tableau 3 : Types de dégradation des sols et leurs caractéristiques. Adapté selon Lal, 2020 et Mathieu, 2020.....	15
Tableau 4 : 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).	16
Tableau 5 : Liens potentiels entre les différents acteurs (Scientifiques, Agriculteurs, Décideurs et Spécialistes du marketing) engagés pour la séquestration du C dans le sol.	24
Tableau 6 : Milieu biophysique du profil de Rendzic Leptosol	58
Tableau 7 : Caractères généraux du profil de Rendzic Leptosol.....	58
Tableau 8 : Tableau : Description des horizons du profil.....	59
Tableau 9 : Milieu biophysique du profil de Calcic Cambisol.....	60
Tableau 10 : Caractères généraux du profil de Calcic Cambisol	60
Tableau 11 : Description des horizons du profil	61
Tableau 12 : Milieu biophysique du profil de Rendzic Leptosol positionné au versant	63
Tableau 13 : Caractères généraux du profil du Rendzic Leptosol.....	64
Tableau 14 : Description des horizons du profil	64
Tableau 15 : Milieu biophysique du profil d'un Cambisol	66
Tableau 16 : Caractères généraux du profil d'un Cambisol	67
Tableau 17 : Description des horizons du profil du Cambisol	67
Tableau 18 : Milieu biophysique du profil d'un Vertisol en plateau irrigué	69
Tableau 19 : Caractères généraux du profil de Rendzic Leptosol.....	70
Tableau 20 : Description des horizons du profil	70
Tableau 21 : Milieu biophysique du profil d'un Vertisol en plateau non irrigué	72
Tableau 22 : Caractères généraux du profil de Rendzic Leptosol.....	73
Tableau 23: Description des horizons du profil	73
Tableau 24 : Milieu biophysique du profil d'un Vertisol en plateau non irrigué	75
Tableau 25 : Caractères généraux du profil du Calcic Cambisol	75
Tableau 26 : Description des horizons du profil	76
Tableau 27 : Milieu biophysique du profil d'un Calcic Cambisol	79
Tableau 28 : Caractères généraux du profil du Calcic Cambisol	79
Tableau 29 : Description des horizons du profil	80
Tableau 30 : Descriptif agricole des sections communales et principales espèces cultivées. Les deux dernières colonnes entre parenthèses présentent le % de terres emblavées par culture.	89
Tableau 31 : Répartition des parcelles en fonction des critères choisis (10) pour classer les systèmes de culture.....	93
Tableau 32 : Résumé de la description des systèmes de culture. Les 30 l de pesticides utilisés sur l'année sont considérés comme des produits purs et non en bouillie appliquée.	97
Tableau 33 : Perception des agriculteurs sur l'évolution du rendement des cultures de céréales au cours de ces 10 dernières années. Les 11 parcelles faisant partie du système de pâturage permanent (SSU) ne sont pas incluses.	99
Tableau 34 : Effet de la profondeur du sol sur les différents paramètres physico-chimiques des sols.	109
Tableau 35 : 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).	111

Tableau 36 : 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	113
Tableau 37 : 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.114	
Tableau 38 : Valeurs de stock de carbone organique (MgC.ha ⁻¹) de sols de la région caribéenne.118	
Tableau 39 : Statistiques descriptives des stocks de COS (MgC. ha ⁻¹) des différents types de sol à 0-100 cm et dans l'horizon C du sol, ainsi que de l'azote total et du rapport C/N dans l'horizon de surface..	127
Tableau 40 : Variation des stocks COS (MgC. ha ⁻¹) en fonction des systèmes de culture et de la profondeur du sol.	128
Tableau 41 : Statistique descriptive du ratio COT/argile dans la couche 0-50 cm.....	131

ACRONYMES

ACM : Analyse des correspondances multiples
ACP : Analyse en composante principale
ADEME : Agence de l'environnement et de maîtrise de l'énergie
AFC : Agroforestérie à base de cacaoyer
AFOLU : Agriculture, foresterie et autres utilisations des terres
BAC : Bureau Agricole Communal
BID : Banque Interaméricaine de Développement
C : Carbone
CHCL : Campus Henry Christophe de Limonade
CH₄ : Méthane
CIAT : Comité Interministériel d'Aménagement du Territoire
CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CIT : Carbone inorganique total
Cm : centimètre
CO₂ : Dioxyde de carbone
COS : Carbone organique du sol
COT : Carbone organique total
CT : Carbone total
CCNUCC : Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CNUDB : Convention des Nations Unies sur la diversité biologique
CNULCD : Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification
Da : Densité apparente
EA : exploitation agricole
GCSE : Gestion Conservatoire des Sols et des Eaux.
GES : Gaz à effet de serre
GIEC : Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
GtC : Gigatonne de carbone
Ha : hectare
IHSI : Institut Haïtien de Statistique et d'informatique
INRA : L'institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
ITPS : Groupe technique intergouvernemental sur les sols
IUSS : Union international des sciences du sol
LDN : Land degradation neutrality
MARNDR : Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural

MgC : Méga gramme de carbone
MOS : Matière organique du sol
MRV : Mesure, rapport et vérification
NDT : Neutralité en termes de dégradation des terres
N₂O : Oxyde nitreux
Nt : Azote total
ODD : Objectifs de développement durable
PgC : Pentagrammes de carbone
ppm : Partie par million
OF : Horizon de fragmentation
OH : Horizon humifié
OL : Horizon de litière
pH : Potentiel d'hydrogène
PK : Protocole de Kyoto
PMA : Pays les moins avancés
PRG : Potentiel de réchauffement global
QA/QC : Garantie de qualité/contrôle de qualité
RELEC : Rendzic Leptosols et Epileptics Cambisols
RMQS : Réseau de mesure de la qualité des sols
RSS : Réseau de surveillance des sols
SA : Système agroforestier
SC : Système de culture
SI : Système intensif
SSI : système semi-intensif
SOCLA : Sociedad Científica Latino americana de Agroecología – Société scientifique Latino-Américaine d'agroécologie
SSU : Système de pâturage permanent ou Système sans usage
UEH : Université d'État d'Haïti
WRB : Base de référence mondiale (World Reference Base) pour les ressources en sols.

CHAPITRE I : INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Contexte général de la thèse

En Haïti, avec le développement démographique, la pression sur les sols cultivables est intense. Plus de 50% de la population pratique l'agriculture de subsistance et les mêmes petites surfaces agricoles utiles sont cultivées continuellement sans aucune approche de gestion (Albert et al., 2017). Face aux faibles incorporations de matières organiques, un épuisement continu de leur teneur dans le sol est suspecté. Les sols, supports de nos productions, réservoirs d'eau, de nutriments et de biodiversité, doivent être gérés durablement. Divers facteurs sont mis en cause comme sources d'obstacles à la production agricole en Haïti parmi lesquels on peut citer le Changement climatique, la sécheresse et le manque d'encadrement technique des agriculteurs (Zelaya et al., 2016 ; Paul et Maxime, 2017 ; PAM, 2023, Dorvil et al., 2023).

Le sol est une ressource non renouvelable et limitée qui assure des bienfaits essentiels à la viabilité des sociétés humaines (production de denrées alimentaires, régulation du changement climatique, habitat pour la biodiversité) (Calvaruso et al., 2021). Il constitue un important réservoir de carbone, environ 1500 Gt de C organique dans le premier mètre (Jobbágy et Jackson, 2000 ; Arrouays et al., 2003 ; Grinand et al., 2009).

L'un des leviers majeurs pour réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère est d'accroître chaque année, via l'incorporation de la matière organique dans le sol, le stock de C dans les 30 premiers centimètres du sol de 0,4% à l'échelle globale (Balesdent et Arrouays, 1999 ; Derrien et al., 2016 ; Paustian et al., 2016). Cette incorporation est nécessaire d'une part, pour la fourniture de nutriments aux plantes et aux microorganismes et d'autre part, pour être stabilisée dans les sols en vue de lutter contre le changement climatique en contribuant l'expression de bonnes propriétés chimiques et physiques des sols.

De nombreuses études ont montré que la séquestration¹ du carbone organique (COS) implique le transfert du CO₂ vers le sol. À ce titre, citons, entre autres, les études de Balesdent et al. (2000), de Feller et Chenu (2012), de Lal et al. (2015), de Minasny et al. (2017), de FAO (2017) et de Pellerin et al. (2021) ; Chenu et al. (2022). D'autres, comme celles de Ramesh et al. (2019), de Chenu et al. (2020), de Chevalier et al. (2020) et de Houssokpèvi et al. (2022) suggèrent des pratiques séquestrantes de C. Toutefois, ces études, pour la plupart, mettant en relation les

¹ Selon la FAO (2017), il s'agit d'un mécanisme par lequel le carbone atmosphérique est fixé et stocké dans le sol grâce aux plantes ou aux résidus organiques. A partir du CO₂, la séquestration du COS comporte trois étapes : *i*) prélèvement de CO₂ dans l'atmosphère via la photosynthèse des végétaux, *ii*) transfert de carbone du CO₂ en biomasse végétale et *iii*) transfert du carbone de la biomasse végétale vers le sol dans lequel il est stocké sous forme de COS dans le réservoir le plus instable.

propriétés du sol et le mode d'usage ont été peu développées dans les Caraïbes. Pourtant, un certain nombre de pratiques comme le labour minimal du sol, la fertilisation organique à partir de fumier animal ou de compost, l'apport de matière organique par la préservation des résidus de culture et des cultures de couverture, l'établissement d'une couverture végétale permanente, la rotation des cultures pour la protection biologique et l'utilisation efficace du profil du sol, la gestion en pâturage rotatif et un tassement minimal des sols peuvent grandement contribuer à améliorer la fertilité, la qualité et la santé du sol (FAO, 2021). Les systèmes agroforestiers tropicaux à base de légumineuses ont été également mis en avant par de nombreux chercheurs (Amato et Ladd 1992 ; Mayer et al., 2003, Samaké et al., 2006 ; Jeuffroy et al., 2013 ; Chen et al., 2018 ; Yadav et al., 2018). Ces systèmes de production agricoles peuvent contrecarrer les enjeux liés à la dégradation des terres et à l'insécurité alimentaire.

En Haïti, les études réalisées sur le stockage de C dans le sol sont très peu développées et, s'il en existe, elles ne tiennent pas compte des mécanismes de stabilisation du C. Or, l'évaluation des stocks de C est cruciale non seulement pour développer des stratégies d'apport mais aussi pour évaluer leur efficacité (Nair, 2012). Aussi, les progrès sur la connaissance de la matière organique et la dynamique du carbone dans les sols haïtiens sont nécessaires pour mieux gérer la séquestration du carbone. En raison de cette carence de référentiels sur les stocks de C, il est donc indispensable de connaître au préalable le potentiel offert par les agroécosystèmes haïtiens en particulier selon les pratiques et leur mode d'usages dans les différents compartiments du sol. Les travaux de cette thèse, axés sur la mesure du stock de carbone organique à l'échelle parcellaire, est un premier appui aux politiques publiques de gestion des sols en Haïti.

L'objectif général de ce travail consiste à fournir des estimations des stocks de carbone dans les différentes profondeurs des sols et selon les principaux modes d'occupation des sols à Saint-Raphaël et, de comprendre en quoi l'optimisation du stockage de carbone améliore la fertilité des sols. Il s'agit d'établir le lien entre le stockage du carbone dans les sols et la production agricole durable. Cette étude va permettre de documenter précisément les effets des modes d'usage des terres sur les stocks actuels de MOS.

2. Problématique et organisation de la thèse

Le secteur agricole haïtien fait face à plusieurs défis : produire une alimentation saine et suffisante, limiter son empreinte écologique et s'adapter au changement climatique. Tout le défi de la décennie à venir va être d'identifier des systèmes de cultures résilients, adaptés aux changements climatiques et, limitant les impacts sur les sols et l'environnement. L'enjeu est donc aussi de fournir aux agriculteurs les moyens pour la réalisation d'une évolution dans un cadre d'adaptation au changement climatique. On peut citer en particulier, l'incapacité des sols à remplir les fonctions clés à savoir la disponibilité et le cycle des nutriments, l'agrégation du sol et l'accumulation de C dans le sol (Hurisso et al., 2016).

La République d'Haïti est dominée par un relief montagneux occupant 75% de l'espace, soit 20 000 des 27 750 km² du pays (Bennani et Dory, 2003; Delerue, 2009). En effet, le secteur agricole haïtien est caractérisé par une agriculture de montagne soumise à de multiples contraintes freinant son développement pour une meilleure performance des systèmes de production agricole. Avec une population en croissance rapide, passant de 670 habitants au km² en 1987 à plus de 961 en 2013, la demande de terres arables a augmenté rapidement au détriment des forêts et d'autres zones de végétation indigène. Le couvert forestier est passé de 60% à moins de 2% au cours des six dernières décennies (PNUD, 2014 ; Williams, 2011 ; Salomon, 2021). Seulement 20% du territoire haïtien a des pentes inférieures à 10%, tandis que 63% du pays a des pentes supérieures à 20% (Dolisca et al. 2007). Il a été estimé que seulement 30% du territoire haïtien est propice à l'agriculture et que la plupart de ces terres sont exposées à une grave érosion des sols, ce qui entraîne la perte de la productivité et la baisse des rendements des cultures (Dumas, 2011). Outre cela, les petits agriculteurs de subsistance représentent 50% de la population (Eneas, 2010) et la culture de base la plus répandue est le maïs (Pienaar et Sacks, 2012) qu'ils cultivent continuellement sur la même petite parcelle.

Le carbone du sol se place comme un indicateur universel pour questionner la fertilité des sols et le changement climatique, lié aux changements d'usage des terres naturelles en terres cultivées (Courte, 2019). Cet indicateur varie en fonction de la nature intrinsèque des sols et des pratiques agricoles. De plus, le devenir de la MOS peut varier en fonction des facteurs extérieurs notamment le climat, la topographie mais aussi des facteurs internes qui sont des facteurs locaux incluant le mode d'usage des terres, la végétation et les propriétés du sol. Dans ce cas, les recherches sur la mise au point de nouvelles pratiques, valorisant les interactions sol-plante-élevage et le bouclage des cycles biogéochimiques, doivent être basées sur une valorisation accrue des ressources et une diversification des cultures (Gaba et al., 2015).

Prendre en compte simultanément des mécanismes de protection (gain) et de minéralisation (perte) de la MOS reste un défi dans les sols haïtiens. Au niveau local, les réflexions qui rejoignent des problématiques de nombreuses régions tropicales visent à proposer des modes d'usages des terres et des systèmes de culture et d'élevage plus résilients. Cherchant à définir les meilleurs compromis entre minéralisation et stabilisation de la matière organique, notre question de recherche concerne les interactions entre le stockage de C et les différentes caractéristiques agropédoclimatiques de la commune de Saint-Raphaël. L'évaluation du stock de COS dans divers contextes pédoclimatiques locaux devrait permettre d'identifier les pratiques culturelles et les mécanismes qui permettront d'améliorer la gestion de la fertilité des sols. En d'autres termes, ceux qui limitent le recours aux intrants chimiques tout en maintenant voire augmentant, le stockage de C dans les sols.

Le premier objectif de cette étude consiste à caractériser les systèmes de culture et la morphologie des sols afin d'utiliser ces connaissances pour raisonner un dispositif d'évaluation des stocks de COS. Ainsi, cette première question nous a été posée : au-delà de l'évaluation des pratiques, quels systèmes de culture répondant au mieux pour une gestion conservatoire de la fertilité des sols ? Nous émettons l'hypothèse qu'il existe à Saint-Raphaël une diversité de systèmes de culture (SC) qui se caractérisent, non seulement par les espèces végétales présentes, mais aussi par la diversité des modes de conduite de ces espèces depuis une dizaine d'années, et par leur position dans le paysage. Parallèlement, la description morphologique des sols a été réalisée, ce qui nous a permis de faire une typologie de ces sols (Figure 1). Nous développerons ce premier objectif dans les chapitres 3 et 4. Le chapitre 4 est un outil d'aide à la décision pour tous les acteurs en vue de raisonner des innovations relatives à une gestion intégrée des sols en Haïti.

Le second objectif consiste à évaluer le stock de carbone organique dans les sols selon les systèmes de culture, les types de sol et la topographie. De cet objectif la question suivante a été posée : les stocks de COS sont-ils influencés par l'effet des systèmes de culture ? Comment varient les stocks de carbone en fonction des systèmes de culture, des types de sols et de la profondeur des sols ? Nous émettons l'hypothèse que la biodiversité des espèces végétales présentes dans les agroécosystèmes est un facteur explicatif de la variation du stock de carbone organique des sols à Saint-Raphaël et, que les stocks de carbone organique varient selon les pratiques, le mode d'occupation des sols et les systèmes de culture. Ce second objectif est traité dans le chapitre 5.

Le troisième objectif consiste à mieux décrire la distribution verticale du carbone et d'azote et d'analyser leur représentativité dans les horizons profonds en vue d'établir des relations entre le statut organique des sols et la production agricole durable. Nous proposons de décliner cet objectif selon les questions : existe-t-il du carbone et d'azote dans les horizons profonds et combien y a-t-il de terre fine y compris dans les sols pierreux? Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs pour un meilleur statut organique ? Ainsi nous faisons l'hypothèse que les concentrations en carbone organique et en azote total sont directement liées aux mécanismes d'ordres biotiques et abiotiques. Ce troisième objectif est traité dans le chapitre 6. Les chapitres 4, 5 et 6 sont présentés sous forme d'articles dont les références sont placées en fin de document.

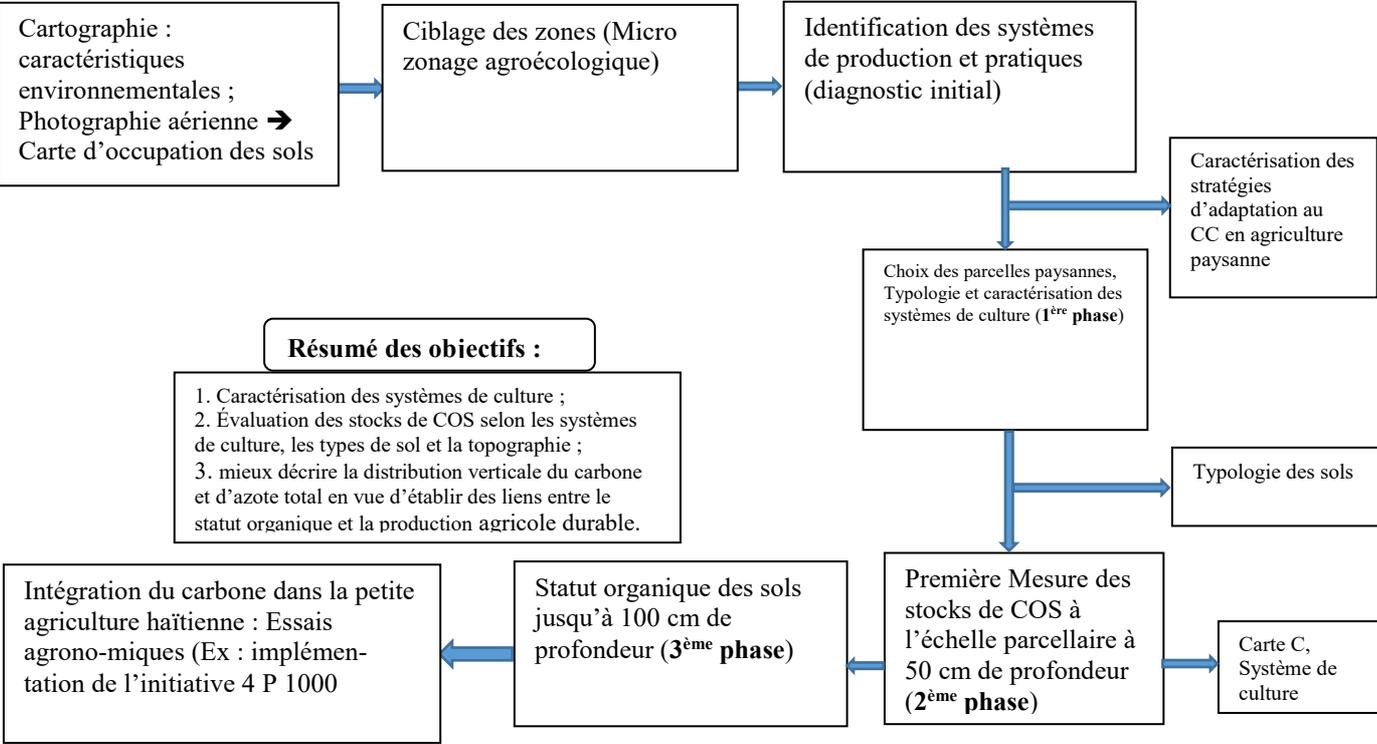


Figure 1 : Démarche méthodologique de la thèse doctorale

**CHAPITRE I : LE SOL ET LE CARBONE ORGANIQUE DU SOL : DU CONTEXTE
GLOBAL AU CONTEXTE HAÏTIEN**

1. Contexte scientifique sur le sol

1.1. Définition du Sol

Le sol² est la couche superficielle de la Terre dans laquelle poussent les plantes. Il est considéré comme l'épiderme de la planète terre, un épiderme mince et fragile. Il constitue un milieu propice à l'implantation et au développement des végétaux quelles que soient les autres conditions de gestion (ombrière, serre, etc.). En effet, les sols sont un facteur déterminant pour la localisation des fonctions productives au sein de l'espace d'exploitation (Marie et al. 2008). Lorsque l'on parle de la "terre", on fait référence à la combinaison de sol et climat. Sans la terre, les êtres vivants n'auraient jamais quitté les océans : non il n'y aurait pas de plantes, pas de cultures, pas de forêts, pas d'animaux...ni les hommes (Gardi et al., 2014). Le sol est une formation naturelle située à l'intersection de la lithosphère, de l'hydrosphère, de la biosphère et de l'atmosphère (Adoum, 2016). Il résulte de l'action conjointe de processus physiques, chimiques et biologiques (altération) sur le support d'origine (la roche mère). L'encadré 1 présente les différentes significations du sol selon Gardi et al. (2014) ; FAO (2017), Chevallier et al. (2020) ; Calvaruso et al. (2021).

Encadré 1

Le sol est un volume qui s'étend depuis la surface de la terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble, peu altérée, ou peu marquée par la pédogenèse. L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus. Il est un maillon central du fonctionnement des écosystèmes et des cycles de l'eau, de l'air et des éléments, et est un écosystème en tant que tel (Calvaruso et al., 2021). En tant que réservoir essentiel du carbone, le sol joue un rôle primordial dans la lutte contre l'augmentation de la concentration des GES. Ils sont au centre des objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies, notamment les ODD 2 « Faim zéro », 13 « Lutte contre les changements climatiques », 15 « Vie terrestre », 12 « Production et consommation durable » et 1 « Pas de pauvreté ». Les questions de maintien de la fertilité des milieux cultivés (ou forestiers) rejoignent les préoccupations environnementales liées à l'adaptation au changement climatique. Dans le sol, c'est la matière organique, un des composants les plus importants du sol qui est le principal réacteur lors des changements qui affectent le sol soumis à des changements naturels ou anthropiques.

² L'AFES (Association Française pour l'Étude du Sol ; www.afes.fr) a adopté en 2014 et confirmé en 2018 la définition suivante : « Le sol est un volume qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble, peu altérée, ou peu marquée par la pédogenèse. L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus. Il constitue, localement, une partie de la couverture pédologique qui s'étend à l'ensemble de la surface de la Terre. Il comporte le plus souvent plusieurs horizons correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux (la terre). Cette organisation est le résultat de la pédogenèse et de l'altération du matériau parental. Il est le lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et micro-organismes) ».

1.2. Composition du sol

Le sol est composé par des éléments minéraux et organiques à l'état solide, liquide et gazeux (MAAARO 2018), qui sont interdépendants donnant lieu à différents niveaux d'organisation à la fois spatiale (tri-dimensionnelle) et temporaire (horaire, saisonnier, des siècles et même des millénaires). La Figure 2 présente la proportion idéale en volume des constituants organiques et inorganiques d'un sol cultivé.

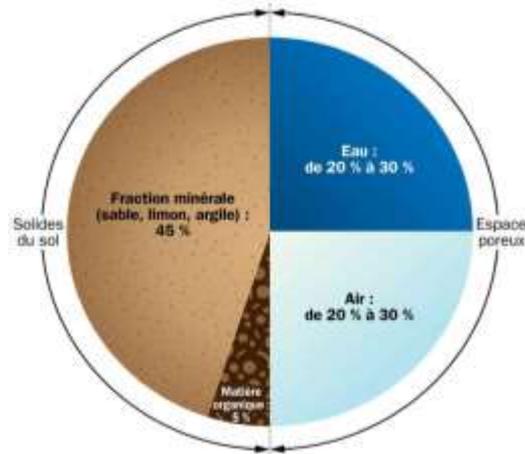


Figure 2 : Composants organiques et inorganiques du sol (adaptée selon MAAARO (2018)).

1.3. Fonctions des sols

Les sols sont une ressource essentielle qui sous-tend la création de tout un éventail de biens et de services inhérents aux écosystèmes et au bien-être de l'homme. Les fonctions du sol sont définies comme ce que fait le sol (Calvaruso et al., 2021), indépendamment de tout intérêt humain (Rabot et al., 2017). Les fonctions du sol sont la manifestation de processus résultant des interactions entre les organismes du sol et leur environnement (composantes physiques et chimiques du sol) (Kibblewhite et al., 2008). Parmi les différentes fonctions citons: le recyclage des nutriments ; la rétention, la circulation et l'infiltration de l'eau ; le stockage, le recyclage et la transformation des matières organiques. On parle de multifonctionnalité des sols car un sol a au sein des écosystèmes un nombre important de fonctions induites par ses propriétés et les processus qui y règnent (Figure 3).

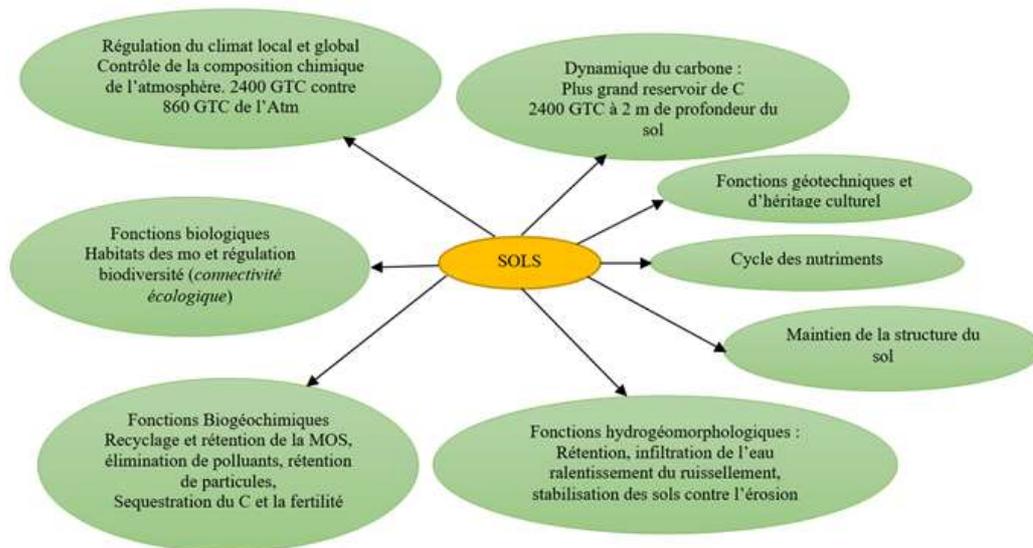


Figure 3 : Schéma conceptuel positionnant le sol comme un capital naturel générant des services écosystémiques en réponse aux besoins humains (Le Roux et al. 2008 ; Minasny et al., 2017 ; Baptist et al., 2018 ; Thoumazeau et al., 2019 ; Monfort et al., 2020 ; Eglin et al., 2021 ; Calvaruso et al., 2021 ; FAO, 2015).

Pour évaluer l'état des fonctions des sols (Tableau 1), Calvaruso et al. (2019) s'étaient basés sur trois grands paramètres (tous types de sols confondus). Ces fonctions peuvent être résumées en quatre grandes catégories : physique, chimique, biologique et écologique.

Tableau 1 : Paramètres retenus pour évaluer l'état des fonctions du sol (FAO et ITPS, 2015 ; Calvaruso et al., 2019)

Paramètres couramment utilisés pour l'évaluation des fonctions du sol		
Physiques	Chimiques	Biologiques
Stabilité des agrégats	Evolution des teneurs en COT et stocks de COS	Abondance et diversité microfaune et macrofaune
Vitesse d'infiltration	Teneurs en ETM (Éléments de Traces Métalliques), HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), Pesticides et PCB (PolychloroBiphényle).	Ratio Champignons-bactéries
Densité apparente	Mobilité des ETM	Diversité taxonomique microbienne
	Teneur en C stable et C labile	Activités enzymatiques
Réserve utile en eau	Teneur en calcaire total	Bio indicateurs accumulation-végétation
Autres : état de surface (érosion, croûte de battance), structure, porosité, état d'humidité, traces d'hydromorphie, texture, épaisseur, pierrosité et compacité.	Autres : pH eau/pH KCl, Teneurs en MOS et en COS, Ratio C/N, teneur en Ntotal, CEC et taux de saturation en cations.	Abondance et diversité verre de terre Bio indicateurs réponse-végétation, Densité, état et profondeur des racines, vitesse de décomposition de la Matière organique.

Outre ces fonctions précitées, le sol procure plusieurs bénéfiques appelés « services écosystémiques » à l'homme. Le Tableau 2 illustre les différents services générés par le sol.

Tableau 2 : Illustration des différents services fournis par le sol

Familles de Services	Services écosystémiques associés	Besoins humains	Propriétés du sol
Culturels	Paysage et esthétique ; Loisir et récréation ; Préservation du patrimoine naturel et architectural ; Héritage naturel et culturel ;	Développement personnel, Relations sociales.	Intrinsèques : types de sol, épaisseur, texture.
Régulation	Contrôle des flux ; Protection contre les inondations et érosions ; Régulation du climat local et global ; Qualité de l'eau et du sol. Lutte biologique.	Santé, Sécurité et besoins physiologiques.	
Approvisionnement	Matières premières : biomasse non alimentaire (bois, chauffage, textile), alimentaire et en énergies ; Stock et approvisionnement d'eau potable ; Paysage et esthétique ; Support physique des bâtiments et infrastructures ; Patrimoine génétique à des fins médicales ou de biodiversité ;	Besoins physiologiques, Santé et Sécurité.	Modifiées par l'homme : Porosité, pH, MOS, nutriments.

1.4. Menaces sur les fonctions des sols en contexte haïtien: Erosion et dégradation des terres

1.4.1. Erosion des sols en Haïti

L'érosion est l'une des principales menaces pour les sols haïtiens. Il s'agit d'un phénomène géologique naturel résultant de l'élimination des particules du sol transportées par l'eau ou le vent. Cependant, certaines activités anthropiques peuvent augmenter considérablement les taux d'érosion. L'usage des terres en pente sans structures antiérosives associé aux mauvaises pratiques culturales a été souvent mis en avant (Lilin, 1986 ; Smolikowski, 1993 ; Dolisca et al., 2007 ; Dumas et al., 2011). Tous les processus d'érosion sont très actifs : le sommet des collines est rongé jusqu'à la roche mère, les sols sont épuisés, les cyclones et les pluies agressives provoquent l'ensablement des cours d'eau et des inondations catastrophiques. La destruction du couvert végétal et des matières organiques (brûlis des résidus de culture) entraînent la dégradation de la structure et de la vitalité des sols et par conséquent, augmente les risques de ruissellement et d'érosion. L'érosion grave est généralement irréversible. C'est le cas des versants et des collines de Saint-Raphaël (Dorvil et al., 2023). À noter que la vitesse moyenne de la formation d'un sol est de 0,1 à 0,2 mm/an alors que l'érosion moyenne exporte 1 mm de sol par an (FAO, 2018). Toutefois, les processus érosifs dépendent d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux. Selon Le Bissonnais et al. (2002), ces facteurs font l'objet d'un consensus et regroupent : le sol (texture, teneur en matières organiques), l'occupation du sol (type de couverture végétale), la topographie et le climat (fortes dénivellations, période de sécheresse). La Figure 4 est une tentative de schématisation du cercle vicieux bien connu en Haïti où les aléas climatiques entraînent l'érosion, qui entrainera par la suite la dégradation des terres. 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 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).

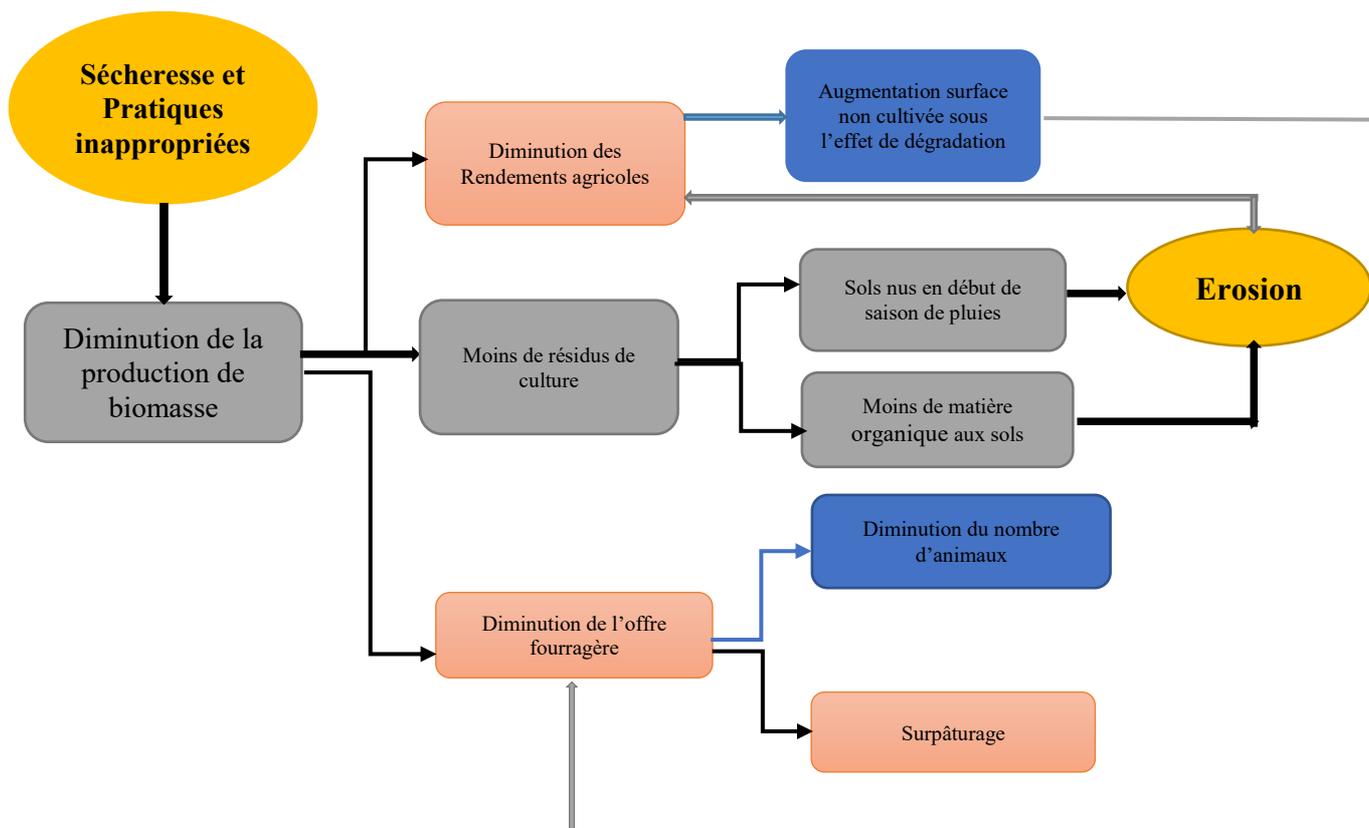


Figure 4 : Schéma relatif aux conséquences des changements climatiques sur la production agricole à Saint-Raphaël (adapté de Smolikowski, 1993).

1.4.2. Dégradation des sols à la suite de la déforestation et des mauvaises pratiques agricoles en Haïti, cas de Saint-Raphaël

La dégradation des terres est définie comme un changement dans l'état de santé du sol qui entraîne une diminution de la capacité de l'écosystème à fournir des biens et services pour ses bénéficiaires (CNULCD ; FAO et ITPS, 2015). Les sols dégradés sont dans un état de santé tel qu'ils ne fournissent pas les biens et services habituels du sol dans son écosystème. À Saint-Raphaël, la surface moyenne des terres agricoles totales par les exploitations agricoles avoisine 1,36 ha. Ceci varie d'une section à une autre. Les agriculteurs réalisent leurs activités agricoles sur une plus grande surface moyenne (1,52 ha) dans la 1^{ère} section Bois Neuf. Par contre, la 4^{ème} section Sanyago comporte la plus petite superficie agricole utile (0,4 ha et moins dans la majorité des cas) mise en valeur par les exploitations agricoles. Aussi les activités agricoles sont soumises au régime pluvial, ce qui crée un frein majeur au développement de certaines cultures à haute valeur économique comme la banane et les cultures maraîchères. De plus, sur le plan géomorphologique, la majorité des exploitations agricoles sont localisées en partie sur des crêtes de montagnes (Dolisca et al., 2007, Dorvil et al., 2023) où les terres sont extrêmement

mises à nues (zone de déprise agricole). Dans ce cas, même les ravines et les cours d'eau ne sont pas épargnés dans ces deux sections (bassins verants).

Limiter la dégradation des sols est une préoccupation récurrente dans les politiques nationales et internationales de développement durable, qui peine cependant à se traduire en mesures efficaces (Ay et al., 2020). Au sens pédologique, la dégradation s'entend comme le processus par lequel un composant ou une propriété du sol (influencée notamment par l'histoire du lieu, sa topographie et la nature de la rochemère) est transformé en une entité plus simple. L'une des causes de la dégradation des terres est liée aux phénomènes érosifs que subissent les terres en particulier celles situées en pente en Haïti. Il en est de même des causes anthropiques liées aux mauvaises pratiques agricoles susmentionnées provoquant indirectement la baisse de la couverture végétale. À noter que lorsque les sols sont dégradés, ils perdent toutes leurs propriétés : physiques, chimiques, biologiques et écologiques, donc, à ce stade ils ne peuvent plus produire. Selon Brabant (2010) citée par la FAO (2015), la chaîne causale entre la population et les ressources en terres provoquant cette dégradation s'explique par l'accroissement de la population rurale (Dorvil et al., 2023). Combiné à la rareté des terres cultivées, ce dernier conduit davantage à la pénurie en terres, l'implémentation des pratiques agricoles non durables et la pauvreté. D'où la cause de la dégradation accélérée des terres en Haïti qui est surtout observée dans les versants et dans les mornes du pays.

De manière concomitante, on assiste à la disparition progressive des espèces agroforestières (*Coffea arabica* (caféier), *Theobroma cacao* (cacaoyer), *Haematoxila campechianum* (campêche), *Inga edulis* (Sucrin)). En outre, la démographie accentue la pression sur le foncier. Les temps de jachère diminuent, les surpâturages semblent de plus en plus manifestes et la dégradation des sols s'exprime par une baisse de fertilité aussi par la perte en sols (Smolikowski, 1993 ; Salomon et al., 2021). Selon les faits historiques, la dégradation du couvert végétal se résume suivant quatre causes (i) l'exploitation de *Haematoxila campechianum* au début du 19^e siècle (exportation et construction) ; (ii) diminution accrue du couvert végétal au profit des cultures suite aux changements apportés dans les pratiques culturales dans les plaines avec l'installation des systèmes d'irrigation dès 1952; (iii) le mode de faire valoir des terres suivant lequel les fermiers et les métayers ne manifestent pas d'intérêt à bien gérer le couvert végétal; (iv) les mauvaises conditions socio-économiques poussant la population à utiliser les arbres comme sources d'énergie et moyens de subsistance. Tous ces changements entraînent une diminution de la capacité du sol à conserver la biodiversité, à stocker du carbone organique (COS), à protéger les sols de l'érosion (Saidou et al., 2009 ;

Atchada et al., 2018 ; Aholoukpè et, al., 2020) et une importante dégradation des terres lorsque ces systèmes agricoles sont établis (FAO, 2015). Le Tableau 3 présente les différents types de dégradation les plus connus.

Tableau 3 : Types de dégradation des sols et leurs caractéristiques. Adapté selon Lal, 2020 et Mathieu, 2020

Dégradation physique	Dégradation chimique	Dégradation biologique	Dégradation écologique
Températures défavorables du sol, salinisation	Salinisation/sodification, acidification	Déstabilisation de la MOS dans le sous-sol, acidification	Changement climatique
Imperméabilisation du sol / Tassement	Contaminations/pollution	Problèmes liés à la nitrification et la dénitrification	Émissions gazeuses du sol (Biodégradation et minéralisation)
Compaction du sol, désertification	Alcalinisation	Méthanogènes	Découplage des cycles biogéochimiques de : H ₂ O, C, N, P, S.
Érosion / glissements de terrain (excès d'eau)	Toxicité	Épuisement de la teneur en matière organique	
Déséquilibre hydrique (sécheresse/inondation)	déséquilibre élémentaire	Destruction des habitats des organismes	
Pas de circulation des gaz	Cycle des nutriments perturbé	Pas de croissance des plantes cultivées	
Infiltration et transport de l'eau et ses solutés au ralenti / manque d'eau	Ralentissement de Sorption-désorption des composés organiques et inorganiques		

1.4.2.1. Synthèse des mécanismes liés à la dégradation des terres à Saint-Raphaël

Le World Overview of Conservation Approaches and Technologies (WOCAT) a défini un ensemble de procédés conduisant à la dégradation des terres (Harari et Liniger, 2017) : L'érosion des sols par l'eau : mouvements de masse (Bois Neuf et Mathurin) ; l'érosion du sol par le vent (Mathurin à hauteur de pente ; la détérioration chimique du sol (baisse de la fertilité et la réduction des matières organiques du sol, la salinisation à Sanyago) ; La détérioration physique du sol (le compactage et l'imperméabilisation des sols à Sanyago : 40 ml/min, donc très faible infiltration, *étude en cours*) ; la détérioration biologique (la diminution de la couverture végétale, l'augmentation des parasites (périmètre irrigué) et la dégradation de l'eau (le changement de la quantité d'eau de surface provoquant assez souvent des conflits). Le Tableau 4 synthétise des données relatives aux historiques d'usages des terres et à la dynamique de la MOS à Saint-Raphaël.

Tableau 4 : 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).

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, Café, Haricot, congo,	Banane, Cacao Pois-	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-	
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 (maraîchères 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.

Nous n'avons pas observé l'usage de matières organiques exogènes. Dans les versants quelques structures antiérosives sont remarquées, constituées de gabions et de bandes enherbées. La végétation naturelle plus ou moins dense, située dans la limite séparant les sections Mathurin et Bouyaha, est dominée par des espèces mésophiles (*Spondias monbin* (Mombin), *Bursera simaruba* (Gommier) et *Prosopis juliflora* (Bayaronde)). Les cultures maraîchères comme le poireau, l'ognon, la betterave et la carotte sont couramment observées sur une même parcelle en association. On n'observe pas de légumineuses pérennes (*Glyricidia sepium* (gliricidia) et *Leucena leucocephala* (Madeleine)) dans la zone. La couverture arborée est dominée par les espèces suivantes : *Mangifera indica* (Manguier), *Persea americana* (Avocatier), *Catalpa longisima* (Chêne), *Simaruba glauca* (Gommier rouge), *Roystonea regia* (Palmier), *Melicocus bijugatus* (Quénéppier), *Samanea saman* (Saman), *Terminalia catappa* (Amandier), *Guarea*

trichilioides, *Inga vera* (Sucrin), *Sweitena mahagoni* (Cajoux), *Ura crepitans* (Sablier ou Rabi), *Anona squamosa* (Cacheman).

1.4.3. Restauration écologique des bassins versants pour la résilience des écosystèmes d'Haïti : Quelle stratégie ?

La restauration écologique est définie comme l'autoréparation d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit. Tandis que la résilience écologique est influencée par le COS, la composition des plantes et les traits racinaires (Erktan, 2014). Selon Six et al. (2004) et Demenois et al. (2017), la résilience des agoécosystèmes dépend de l'interaction de cinq facteurs influençant la formation et la stabilité des agrégats du sol (Figure 5b). Roose (1995) a rapporté que pour augmenter la production de la biomasse et du coup la fertilité des sols tropicaux, il faut gérer à la fois les eaux de surface, les matières organiques et les nutriments en préconisant la couverture végétale. En effet, depuis plus de quatre décennies, des auteurs (Lilin 1986 ; Smolikowski, 1993) ont suggéré des stratégies efficaces pour la restauration des terres dégradées en Haïti. Ces stratégies étaient basées sur la Gestion Conservatoire des Sol et Eaux (GCSE). En revanche, Erktan et al. (2013) ont évoqué la stratégie d'ingénierie écologique pour la restauration des sols et des ravines érodés en vue de permettre de recréer des amas sédimentaires sur lesquels un couvert végétal peut se développer et favoriser la stabilité et la fertilité des sols. Une telle stratégie, schématisée dans la Figure 5, serait pertinente pour la restaurarion des sols en Haïti en particulier dans les versants et les cours d'eau dont les berges sont dévégétalisées.

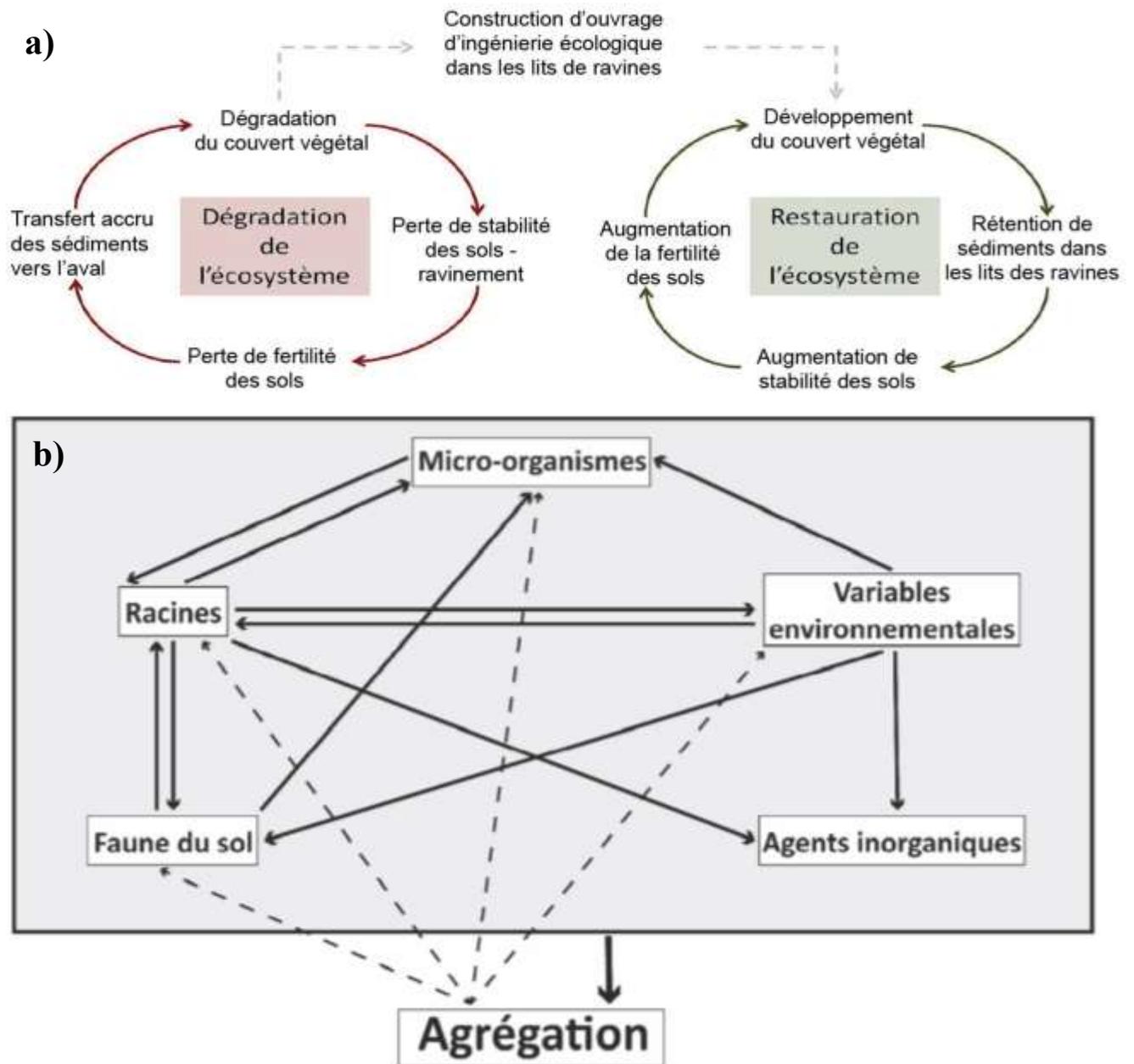


Figure 5 : Schématisation de la stratégie d'ingénierie écologique pour la restauration des ravines érodées et des versants en Haïti. Adaptée par Erktan et al. (2013) (a) ; (b) multiplicité des interactions et des rétroactions entre les facteurs majeurs influençant la formation et la stabilité des agrégats du sol (Six et al., 2004 ; Demenois et al., 2017).

2. Le carbone organique des sols (COS) : du contexte global au contexte haïtien

2.1. Changement climatique

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) définit le changement climatique comme « une variation de l'état du climat, qu'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période. Généralement, il se manifeste par une augmentation de la température moyenne à la surface de la terre de l'ordre de 0,2 ou 0,3 °C tous les dix ans (GIEC, 2013). Dans le même temps, les émissions mondiales de gaz à effet de serre n'ont fait que croître, et on observe déjà un réchauffement moyen global de 1,26°C par rapport à l'ère préindustrielle (GIEC, 2021). Vagues de chaleur, sécheresses, montée du niveau de la mer par son rythme sont ses principales conséquences (Guivarch et Taconat, 2020). Celles-ci mettront à rude épreuve la capacité d'adaptation des êtres vivants. Comme tous les problèmes environnementaux de portée mondiale, le changement climatique affecte des sociétés qui se trouvent dans des situations extrêmes, les pays en développement³ comme Haïti et l'Afrique de l'Ouest sont les plus touchés (FAO, 2017). L'accroissement du taux de CO₂ et des autres gaz à effet de serre (GES) comme le méthane CH₄ et le protoxyde d'azote ont pour conséquence une augmentation de la température planétaire. La hausse de la température à la surface du globe au cours des deux premières décennies du 21^e siècle (2001–2020) est de 0,99 °C (0,84–1,10 °C) par rapport à 1850–1900. Elle est plus élevée de 1,09 °C (0,95–1,20 °C) sur la période 2011–2020 qu'en 1850–1900 (Figure 6).

³ <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519>

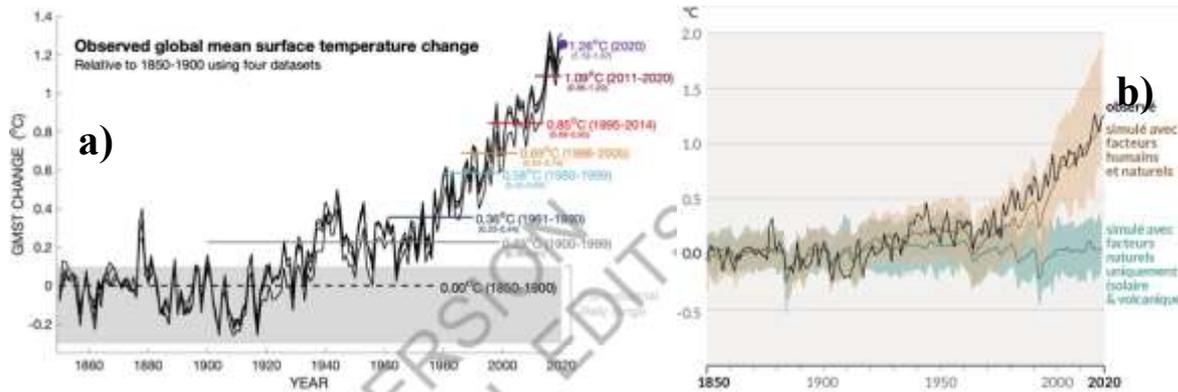


Figure 6 : Historique des changements de température à l'échelle planétaire et causes du réchauffement récent. Historique des changements de température à l'échelle planétaire et causes du réchauffement récent : a) température moyenne à la surface du globe observée à partir de quatre ensembles de données de 1900 à 2020, par rapport à la température moyenne de 1850-1900 ; b) Changements de la température à la surface du globe au cours des 170 dernières années (ligne noire) par rapport à 1850–1900 et en moyenne annuelle, comparés aux changements simulés par les modèles climatiques de la phase 6 du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP6) (IPCC, 2021).

Ainsi, face aux menaces grandissantes du changement climatique, le carbone rend des services essentiels à l'humanité et devient à la fois la cause de pollution mais aussi le moyen de lutte contre elle en favorisant son stockage et sa séquestration dans la biomasse végétale et, plus particulièrement dans les sols pour tenter d'atténuer les effets du changement climatique.

En Haïti, le changement climatique et la variabilité des précipitations représentent un défi majeur. Le climat des Antilles pour la période 2030-2080 accusera un réchauffement net avec une augmentation de la température moyenne annuelle et des possibles assèchements sur certaines îles. L'activité cyclonique devrait montrer une augmentation de la proportion des ouragans majeurs et des pluies cycloniques dans l'Atlantique avec réduction de la saison cyclonique dont l'activité se déplace vers le bord.

Région tropicale, de nombreuses études évoquent sa vulnérabilité positionnée dans l'arc caraïbe malgré sa faible contribution aux émissions mondiales de GES (Albert et al., 2017 ; PAM, 2023). Donc, Il sera difficile, voire impossible, d'éradiquer la pauvreté et la faim en Haïti sans envisager la résilience des petits exploitants face au changement climatique en généralisant l'adoption de pratiques durables de gestion des terres. L'adaptation des petits exploitants aux risques liés au changement climatique sera essentielle pour réduire la pauvreté et améliorer la sécurité alimentaire.

Depuis des décennies, beaucoup d'auteurs évoquent le rôle du sol sur l'adaptation et l'atténuation au changement climatique (Germon, 1998 ; Derrien et al., 2016 ; Pellerin et al., 2019 ; Monfort et al., 2020 ; Calvaruso et al., 2021, Chenu et al., 2022). Il en est de même du carbone organique du sol qui est vu comme un indicateur de la multifonctionnalité du sol (santé du sol, qualité du sol et indicateur de la fertilité du sol) (Fournil et al., 2018 ; Courte, 2019).

Toutefois, aucune mesure tangible n'est encore prise en termes d'adaptation dans ce pays. Des études relatives à l'estimation des stocks de carbone organique du sol n'y sont toujours pas d'actualité non plus. Pourtant, l'initiative internationale « 4 pour 1000 » lancée par la France en décembre 2015 lors de la COP21 visait à montrer qu'une augmentation de 0,4% ou 4‰ par an de stocks de MOS/COS dans les 30 premiers centimètres des sols agricoles est un levier majeur pour améliorer la fertilité des sols et la production agricole et, participer au respect de l'objectif à long terme de limiter la hausse des températures à plus de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels (IPCC, 2022). Seuil au-delà duquel les conséquences induites par le changement climatique seraient d'une ampleur significative. De plus, Haïti fait partie des trois pays déjà les plus affectés par les risques climatiques sur la période allant de 2000 à 2019 (Eckstein et al., 2021). D'où l'intérêt de conserver les sols à court et moyen terme pour l'humanité comme l'ont évoqué Bispo et al., (2016).

2.2. Emissions globales des GES : causes, sources et mécanismes

Les principales sources de GES sont : l'agriculture, la foresterie et d'autres mode d'utilisation des terres représentant 23%, l'énergie fossile (35%), le transport (14%), l'industrie et déchets (21%), la construction qui représente 6% (GIEC, 2014). Les concentrations actuelles de CO₂ augmentent considérablement par rapport à la période préindustrielle passant de 277 parties par millions (ppm) en 1750 à 405 ± 0,1 ppm en 2017 (Dlugokencky et Tans, 2018) et atteignent de nos jours 420 ppm (NOAA, 2023).

Le CH₄ (40% des émissions anthropiques) issu de la fermentation entérique des animaux et le CO₂ (24%) sont les deux principaux gaz à effet de serre (GES) contenant du carbone (GIEC, 2007 ; GIEC, 2014). Il en est même du N₂O (36%) issu de la fertilisation azotée (rizières en particulier). L'impact potentiel de ces gaz sur le climat (CO₂, CH₄ et N₂O) diffère en fonction de leurs efficacités relatives, c'est-à-dire leur potentiel de réchauffement global (PRG). Le CO₂ est considéré comme ayant un PRG de 1, suivi par le CH₄, avec un PRG égal à 28 sur une échelle de 100 ans et, le N₂O possédant le PRG sur 100 ans le plus élevé, équivalent à 310 (ADEME, 2021). Le CH₄ est émis par les sols au travers d'un mécanisme appelé la méthanogénèse qui apparait lorsque la matière organique est décomposée en milieu

d'anaérobie. C'est le cas des rizières, des zones humides et des tourbières qui en sont des principales sources de CH₄.

2.3. Le carbone des sols au cœur des négociations internationales : l'initiative 4 pour 1000 des sols pour la sécurité alimentaire et le climat.

La 21^{ème} Conférence (COP21) des Parties aux Nations Unies dans le cadre de la Convention-cadre sur le changement climatique a eu lieu à Paris le 30 novembre (Rhodes, 2016). Dans le cadre de cette conférence, les parties prenantes se sont engagées dans un plan d'action volontaire à mettre en place des pratiques agricoles qui maintiennent ou accroissent les stocks de carbone dans les sols agricoles et préserver les « sols riches » en carbone (Chambers et al., 2016 ; Lal, 2016). La Figure 7 présente une tentative de schématisation de l'initiative 4 pour 1000 pour les sols et le climat.

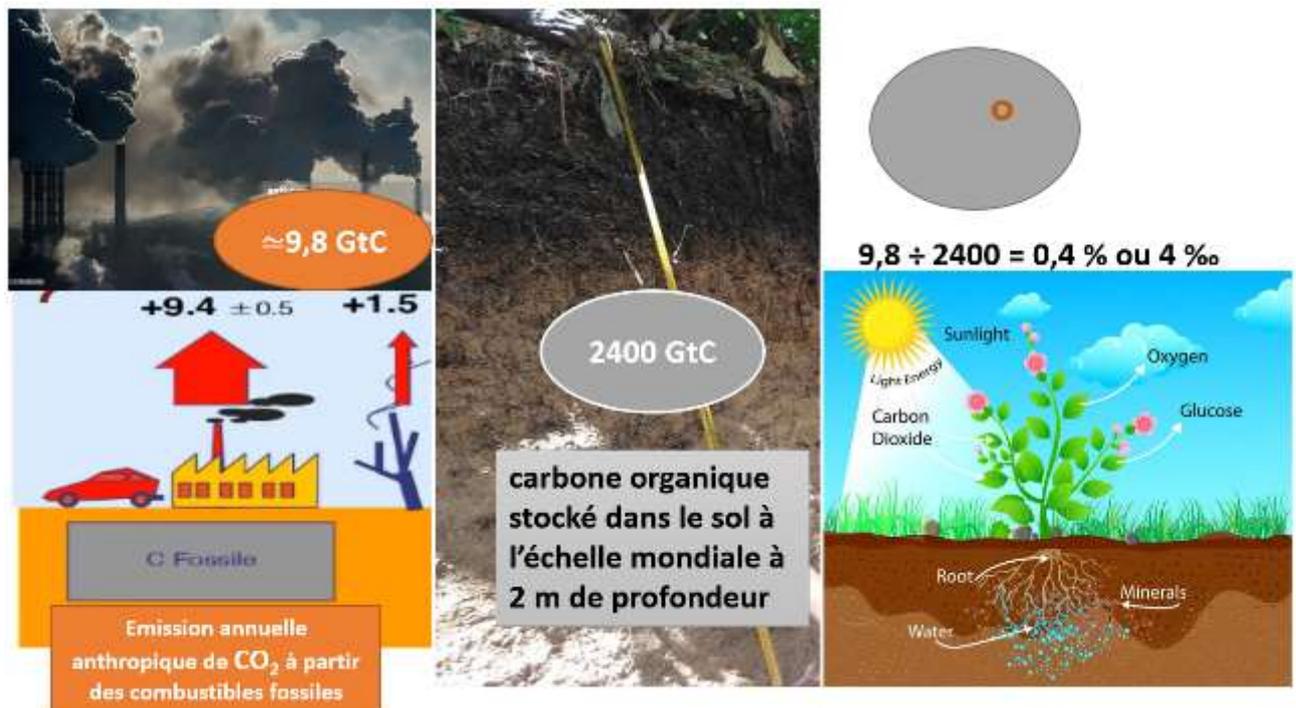


Figure 7 : Conception dans la pratique de l'initiative de séquestration du carbone 4 pour 1000 dans le sol (adaptée de Minasny et al., 2017).

Le 4 pour 1000 est une initiative (<https://4p1000.org>) fixant l'objectif global pour promouvoir une bonne gestion des sols qui peuvent aider à atténuer le changement climatique (Minasny et al., 2017a, Pellerin et al., 2019). Pour maintenir le réchauffement en dessous de 2° C par rapport à la période préindustrielle, il faut limiter notre effet de serre annuel estimé à 8,9 à 9,8 Gt (8,9 - 9,8 × 10¹⁵ g) de C à 64% de probabilité (Meinshausen et al., 2009 ; Minasny et al., 2017b).

En d'autres termes, une diminution de 3,5 à 4,3 Gt an⁻¹ du C atmosphérique limiterait l'augmentation de la température à +1,5/2°C d'ici 2050 (Dignac et al., 2017). Une telle diminution annuelle de la concentration atmosphérique de GES serait compensée par une augmentation annuelle des stocks de COS de 0,4% ou 4‰ dans les 30 premiers centimètres du sol (Balesdent et Arrouays 1999 ; Paustian et al. 2016).

Les émissions annuelles de gaz à effet de serre de carbone fossile sont estimées à 9,8 GtC et une estimation globale du stock de COS jusqu'à 2 m de profondeur de 2400 Gt a été suggérée par Batjes (1996) et citée par Minasny et al. (2017). Selon ces derniers, la valeur de 0,4% provient du ratio de l'anthropogénicité mondiale des émissions de C et le stock total de COS (9,8/2400) qui est l'augmentation de stock de C nécessaire dans le sol pour compenser l'émission anthropique de CO₂ à 0-30 cm (ADEME, 2015 ; Pellerin et al., 2020).

2.4. Quelles pratiques pour stocker annuellement dans le sol les 4,3 Gt de C de l'atmosphère ?

Il a été suggéré d'augmenter le COS pour atténuer le changement climatique avec un avantage supplémentaire d'amélioration de la structure du sol. Une telle augmentation qui est également bénéfique pour la fertilité et la santé des sols (Courte, 2019). Pour atteindre cet objectif, tous les sols de la planète devraient être concernés (sols agricoles, sols forestiers, tourbières, sols dégradés, etc.). L'objectif de la séquestration annuelle du C peut être atteint par l'adoption des meilleures pratiques agricoles telles que le zéro labour, les plantes de couverture ou l'amélioration des pâturages, l'agroforesterie (FAO, 2018 ; Chenu et al., 2022). La Figure 8 présente les grands flux mondiaux. Les surfaces agricoles détiennent environ 800 Gt de C à 0-30 cm. Alors que ce niveau de stocks de COS peut atteindre jusqu'à 2400 GtC dans les 100 à 200 cm du sol. En effet, les 4,3 Gt C an⁻¹ émis annuellement dans l'atmosphère sont considérés comme le potentiel d'atténuation des GES pour les pratiques de gestion des sols (Minasny et al., 2017a ; Le Querré et al., 2018 ; Pellerin et al., 2021). On voit que le secteur « Agriculture, Foresterie et autres utilisations des terres (AFOLU) », représentant 23% des émissions de GES, peut aussi permettre au sol de stocker annuellement les 4,3 GtC de l'atmosphère. Le Tableau 5 présente les liens entre les différents acteurs pour le piégage du C dans le sol dans un contexte d'adaptation et d'atténuation du changement climatique.

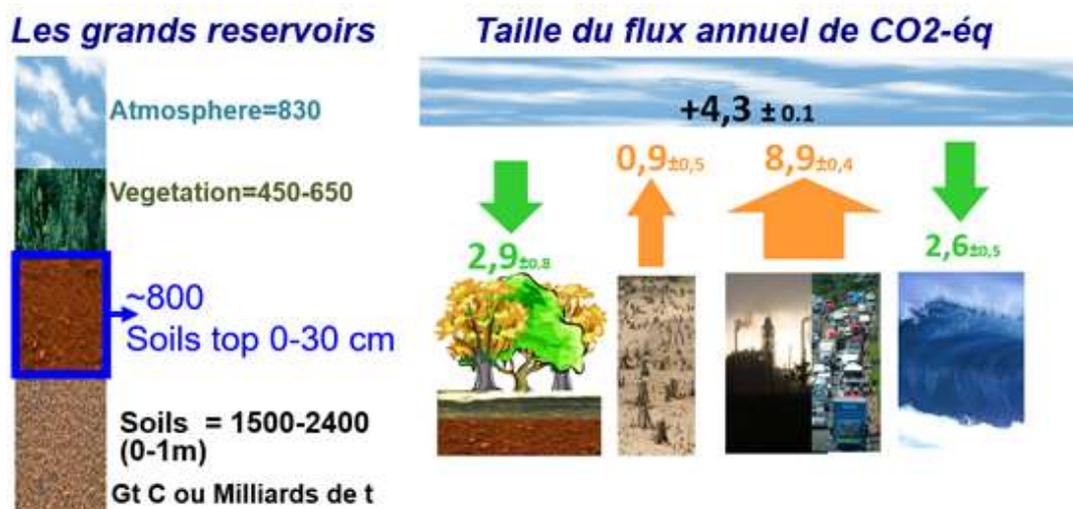


Figure 8 : Flux annuel sur taille du réservoir des sols (Adaptée d'IPCC, 2014) en lien avec le 4%.

Tableau 5 : Liens potentiels entre les différents acteurs (Scientifiques, Agriculteurs, Décideurs et Spécialistes du marketing) engagés pour la séquestration du C dans le sol.

Principaux Acteurs	Missions	Rôles
Scientifiques	Innovation	Développement de nouvelles technologies de mesure, de cartographie numérique des sols, de modélisation, des audits pour vérifier la séquestration du COS, fonctionnement du COS ; Durabilité/persistance du COS.
Agriculteurs et les gestionnaires des terres	Assurance de la conformité aux décideurs politiques	Pratiques de gestion pour améliorer l'état du sol et l'augmentation du rendement et : labour minimum, pâturage amélioré, gestion des résidus de culture, gestion durable des sols. Contribution à la séquestration du carbone et à l'atténuation du changement climatique.
Des décideurs politiques	Facilitation	4 pour 1000, protocole de kyoto, initiative de production de carbone, stratégie thématique de l'état haïtien sur les sols.
Le secteur privé	Confiance dans l'investissement	Capital naturel, chaînes d'approvisionnement des produits, C trading.

Le carbone du sol peut être organique (55% de a MOS), mais il peut aussi exister sous forme minérale (carbone inorganique). À l'échelle de la planète, les réservoirs du COS sont les sols et la végétation (GIEC, 2007 ; Le Quéré et al., 2018 ; Chevallier et al., 2020 ; Chenu et al., 2022). Mais le carbone inorganique (CIT) peut exister dans l'atmosphère (CO₂), les océans (HCO₃⁻) et sous forme solide dans les sédiments et les roches carbonatées (CaCO₃, CaMg(CO₃)₂, Na₂CO₃, FeCO₃) (Bernoux et Chevallier, 2013).

2.5. La matière organique du sol (MOS), moteur de la qualité et de la santé du sol :

La qualité d'un sol est définie comme « la capacité d'un type spécifique de sol à fonctionner, dans les limites d'un écosystème naturel ou géré, pour soutenir la productivité végétale et animale, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air, et soutenir la santé humaine et l'habitation » (Karlen et al., 1997). C'est la capacité des sols à remplir des fonctions et à assurer des services écosystémiques (Walter et al., 2015). Cependant, la santé d'un sol est liée à sa performance. C'est le fonctionnement réel du sol relatif à son potentiel.

En effet, la matière organique du sol (MOS) est l'un des indicateurs clés de la santé et de la qualité des sols (Brookes, 2001). Elle décrit les constituants organiques du sol à différents états de décomposition, comme les tissus provenant de végétaux ou d'animaux morts, d'une taille de moins de 2 mm, et organismes du sol (FAO, 2017). À l'état solide, elle regroupe l'ensemble des constituants organiques présents dans le sol, qu'elle soit d'origine végétale, animale ou microbienne, qu'elle soit transformée ou non, vivante ou non. La MOS se compose de composés intrinsèquement stables et chimiquement uniques (Lehmann et Kleber, 2015) en jouant un rôle critique dans la stabilisation de la structure du sol (Lorenz et Lal., 2014), la rétention et la libération de nutriments pour les végétaux et le maintien de la capacité de rétention des sols.

2.5.1. Répartition de la MOS :

La MOS comprend un mélange complexe de substances organiques partiellement décomposées dérivées de la litière végétale ainsi que de la biomasse faunique et microbienne (FAO, 2018). Elle représente en général entre 1 et 10% de la masse des sols (Figure 9).

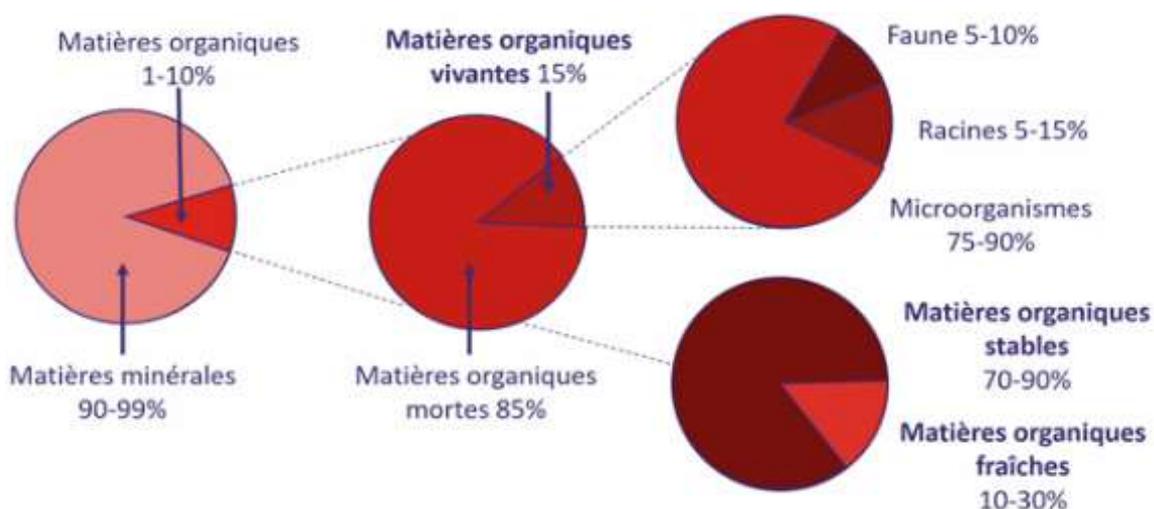


Figure 9: MO des sols agricoles : proportion totale dans le sol en concentration et formes (adapté de Van Camp et al., 2004)

2.5.2. Rôles de la MO dans le sol

La MOS contribue directement et indirectement via les activités biologiques à la fertilité chimique des sols. Elle permet la substitution de tout ou partie des engrais minéraux utilisés en agriculture. La MOS contribue fortement aux propriétés biologiques, chimiques et physiques du sol. Elle peut également exercer une influence sur le fonctionnement des écosystèmes et l'ampleur des divers processus écosystémiques obligatoires (Baldock et Nelson, 2000). Il a été prouvé qu'une teneur de 5% en MOS procure au sol une bonne santé (MAAARO, 2018).

À court terme, la biodégradation de la matière organique dans le sol dépend de la présence des décomposeurs, de la nature biochimique et la composition élémentaire des MOS, la disponibilité des nutriments, et de l'existence des conditions favorables à l'activité des microorganismes comme la température, l'humidité, l'air, le pH, l'accessibilité des substrats et l'absence des contaminants (Amato et Ladd, 1992 ; Chevallier et al., 2004 ; Chenu et al., 2009, Hamdi et al., 2013). À long terme c'est la protection physique assurée par l'argile et les interactions organominérales qui assurent la dynamique de la MOS. L'importance de ce processus à long terme dépendra de la nature des entrées, du type de sol, du mode d'occupation et des pratiques agricoles et forestières (Feller et Chenu, 2012). La MOS joue aussi un rôle fondamental pour les autres compartiments de l'environnement (Figure 10) en participant au maintien de la qualité de l'eau par leur forte capacité de rétention des polluants organiques (pesticides, hydrocarbures...) et minéraux (éléments traces métalliques), mais elle est aussi source de polluants potentiels, comme les nitrates et les phosphates. Elle influence également la qualité de l'air, par le stockage ou l'émission de GES. Ainsi, elle joue un rôle de puits ou de source de C sous forme de CO₂ (Le Bissonais et Arrouays, 1997 ; Balesdent et al., 2004).

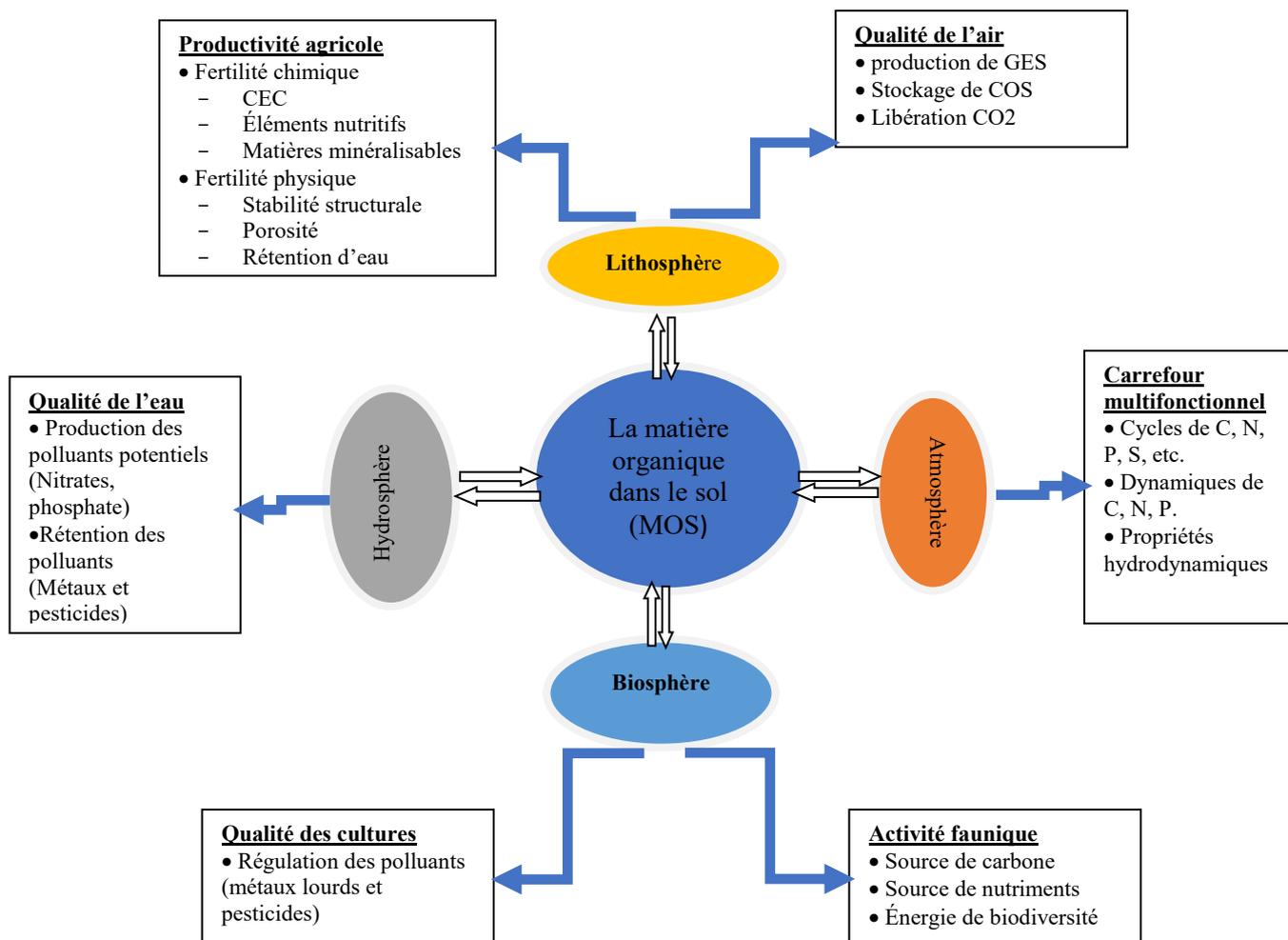


Figure 10 : Rôle de la matière organique du sol dans le compartiment sol, schémas adapté d'Adoum, 2016.

2.6. Le carbone organique des sols (COS) : constituant principal de la MOS

Le COS est le principal constituant de la MOS et représente 55 à 60% de la proportion de la MOS correspondant au COS (FAO et ITTPS, 2015 ; FAO, 2018 ; Chenu et al., 2022). Ces deux termes sont souvent confondus, on parle surtout de MOS au niveau agronomique et de carbone sur le plan climatique. Le carbone est le quatrième élément chimique le plus abondant dans l'univers et fait partie de toutes les molécules organiques comme le glucose, les protéines et les acides nucléiques. La Figure 11 présente la variation des stocks de carbone organique dans la Caraïbe.



Figure 11 : Carte de stocks de COS de l'Amérique Latine à 0-30 cm du sol selon Gardi et al. (2014).

Le COS est divisé en trois grands réservoirs en fonction de sa stabilité physico-chimique (Von Lützw et al. 2008 ; O'Rourke et al., 2015 ; Sahoo et al., 2019) :

- 1) le réservoir rapide encore appelé réservoir labile ou actif ou carbone labile tout court : après addition de carbone organique frais dans le sol, la biomasse initiale est décomposée au bout de 1 à 2 ans. Son renouvellement (turnover) se produit dans un délai d'un jour à un an (Dignac et al., 2017). Ce pool est soumis à une oxydation rapide et est sujet à une décomposition rapide contribuant à l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère (Dumale et al., 2011) ;
- 2) le réservoir intermédiaire ou réservoir lent qui comprend le carbone organique partiellement stabilisé sur des surfaces minérales et/ou protégé au sein d'agrégats après transformation

par les microbes. Le temps de renouvellement est de l'ordre de quelques années pouvant atteindre des décennies (100 ans). Ce réservoir est aussi fourni par les produits de dégradation du pool intermédiaire et est influencé par les pratiques de gestion des sols. Les pools lents de COS sont relativement résistants à la décomposition ;

- 3) Le réservoir stable ou réservoir passif ou réfractaire : il s'agit du COS hautement stabilisé. Le renouvellement très lent variant de 100 à plus de 1 000 ans. Ce réservoir est très résistant à la décomposition et ne pourrait donc pas servir de source immédiate de nutriments (Lorenz et al., 2011). À ce dernier réservoir, Lehman et al. (2015) ont ajouté un réservoir lent additionnel de COS dénommé COS pyrogénique, formé à partir de biomasse partiellement carbonisée durant des feux sauvages. Dans ce réservoir, la MOS peut être trouvée sous ces deux : formes d'agrégats, dans les surfaces minérales constituant ainsi le complexe organominéral stabilisé (Chenu et al. 2019). Les MO stables des sols, en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques et du pH du sol, peuvent tout comme les minéraux argileux du sol retenir des cations : elles contribuent ainsi à la Capacité d'Echange Cationique (CEC) des sols.

2.6.1. Rôles du carbone organique du sol (COS)

2.6.1.1. Régulation de la biodiversité et bien être humain

La structure de la communauté microbienne du sol est largement influencée par la qualité et la quantité de COS et dans une moindre proportion par la diversité végétale (Thiele Brunh et al., 2012 ; FAO, 2017). La biodiversité du sol (bactéries, champignons, protozoaires, insectes, vers, et autres invertébrés et mammifères) joue un rôle crucial dans l'amélioration de la production alimentaire et la résilience du sol face au changement climatique (Han et al., 2020 ; Gerke, 2022). Cette biodiversité contribue grandement à la formation de MOS à partir de la litière organique, contribuant ainsi à l'augmentation du contenu en COS.

2.6.1.2. Fertilité du sol et la production alimentaire

D'une définition réductive de la fertilité du sol dans les années 1960-1970, elle est une approche chimique (fertilité minérale), physique (état de structure) et biologique. En 1996, Soltner l'a défini comme « l'aptitude d'un sol à produire toute la chaîne alimentaire allant des micro-organismes à l'homme, en passant par la plante et l'animal, et ceci pendant des générations » (Hamon et al., 2011). Selon la FAO (2017), elle correspond à la capacité du sol à supporter et soutenir la croissance des végétaux, notamment en rendant l'azote, le phosphore, le potassium et d'autres nutriments disponibles pour l'assimilation par les plantes. Aubert et Boulaïne (1980) l'ont défini comme le produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches

supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent ». Ce mécanisme est facilité par **i)** le stockage des nutriments dans la MOS ; **ii)** le recyclage des nutriments de la forme organique à une forme minérale disponible pour les végétaux et **iii)** des mécanismes physico-chimiques qui contrôlent l'absorption des nutriments, la disponibilité, le déplacement et les éventuelles pertes vers l'atmosphère et l'eau (FAO, 2017).

Il convient de signaler que les mécanismes de conservation et d'amélioration de la fertilité des sols par les arbres ont été bien développés par « International Centre for Research in Agroforestry ». Parmi ces mécanismes, l'agroforesterie est reconnue pour son action sur les composantes physiques (structure du sol, capacité d'infiltration et de rétention), chimiques (cycle des nutriments et en particulier celui de l'azote en lien avec l'intégration des légumineuses pérennes (Nair et al., 1999 et Dommergues et al., 1999) et non pérennes (Haricot, Pois-congo, pois inconnu, etc.) et biologiques des sols (production et transformation de la matière organique). La Figure 12 présente quelques facteurs, processus et effets des pratiques conciliant les arbres sur la séquestration du COS.

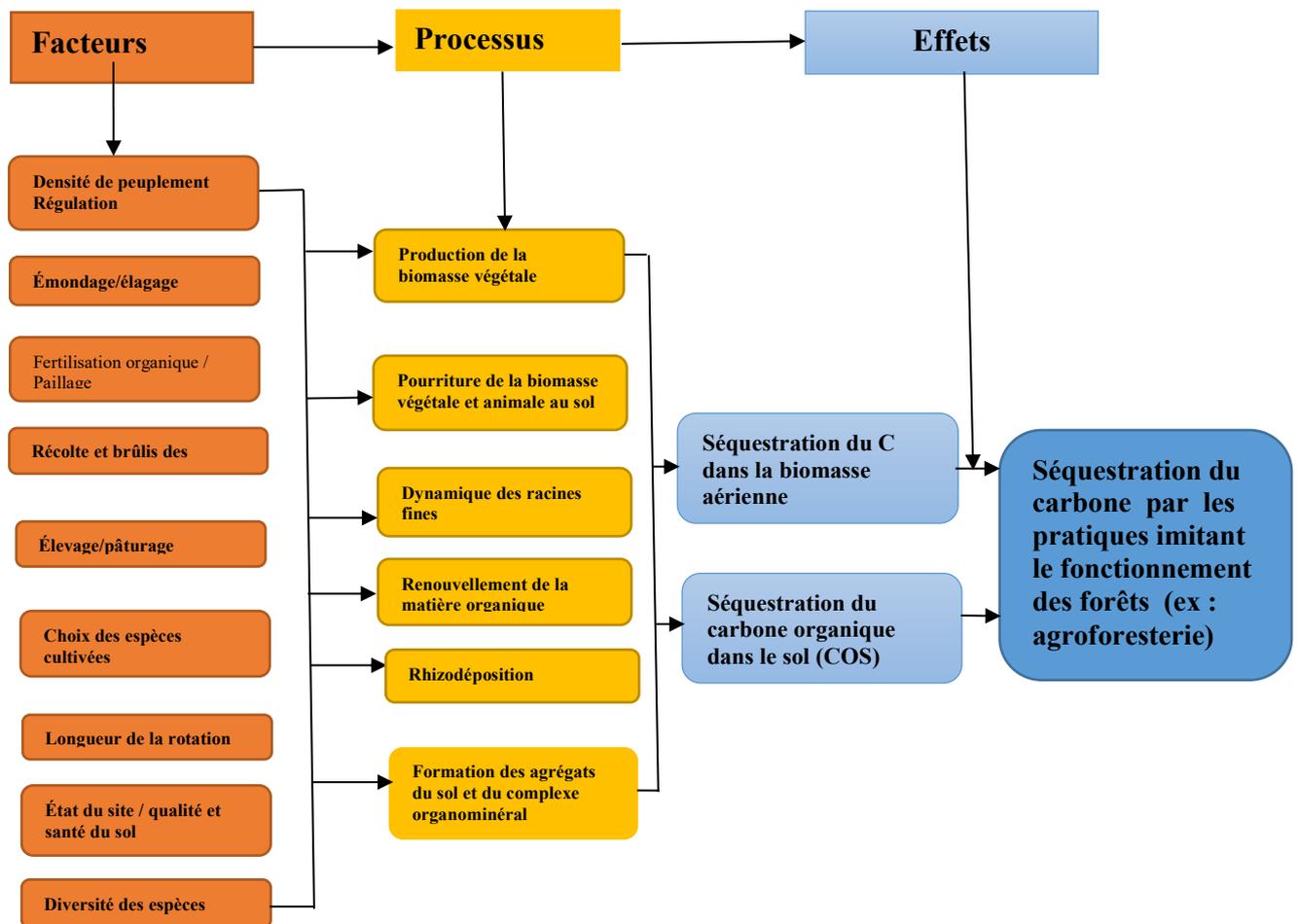


Figure 12 : Facteurs, processus et effets des pratiques conciliant les arbres, la diversité de culture et les animaux sur le potentiel de séquestration du carbone (adapté de Nair et al., 2009).

2.6.2. Mécanismes de stabilisation du COS dans le sol

Dans la littérature, bon nombre d'auteurs (Six et al., 2002; Six et al., 2006 ; Razafimbelo et al., 2006 ; Jastrow et al., 2007; Kane, 2015) proposent des mécanismes pour la stabilisation du carbone dans le sol. Ils rapportent que le carbone et/ou la MOS nouvellement ajouté peut être stabilisé dans le sol au moyen des mécanismes physiques, chimiques et biochimiques.

- 1) Chimiquement, en se fixant aux argiles par des liaisons chimiques, empêchant la consommation de carbone par les microorganismes ;
- 2) Biochimiquement, le carbone peut être ré-synthétisé en des structures moléculaires complexes qui peuvent freiner la décomposition. Razafimbelo et al. (2006) l'ont attribué au mécanisme de « récalcitrance » ;
- 3) Physiquement, par isolation à l'intérieur des micro et macro agrégats du sol d'où il est inaccessible aux organismes du sol (Chevallier et al., 2010). Des corrélations positives et

significatives entre la stabilité des agrégats et la teneur en C du sol ont été signalées, laissant supposer l'existence de ce processus de protection (Feller et al., 1996 ; Albrecht et al., 1998 ; Razafimbelo et al., 2006).

Toutefois, Dignac et al. (2017) et Sagar et Singh (2020) ont suggéré des mécanismes d'ordres biotiques et abiotiques pour la stabilisation des stocks de COS dans le sol. Le premier est étroitement lié à la biomasse vivante des sols et à la biodiversité des sols comme les plantes, la faune et les microorganismes.

2.6.3. Facteurs influençant la distribution du carbone dans les sols

Les facteurs majeurs sont le climat, les types de sol et l'usage du sol. La FAO (2002) a évoqué la végétation (apport de résidus, composition de la plante), les facteurs climatiques (température/conditions d'humidité) et les propriétés physico-chimiques du sol (texture, teneur en argile, minéralogie, acidité).

2.6.3.1. Facteurs climatiques

Le climat conditionne la croissance de la végétation et la vitesse de décomposition de la MOS. Le climat détermine le type de sol. La température et les précipitations sont les facteurs climatiques les plus significatifs en matière de contrôle de la dynamique du C dans le sol (Deb et al., 2015). Bien qu'une augmentation des températures entraîne une augmentation de la production végétale (quand les conditions d'alimentation hydrique sont favorables) et donc les apports de carbone au sol, elle tend aussi à augmenter la décomposition microbienne du COS (Keestrea et al., 2016). Par contre, une forte conviction empirique véhicule l'idée que l'augmentation des températures stimulera la perte nette de carbone du sol vers l'atmosphère, conduisant à une rétroaction carbone terrestre-climat positive qui pourrait accélérer le changement climatique (Crowther et al., 2016). Il faut également noter que, selon Marschner et al. (2008) et Thévenot et al. (2010), la récalcitrance chimique présumée de molécules complexes qui accumulent le COS, comme la lignine ou les lipides, ne contribue pas substantiellement à la persistance de la MOS dans le sol. Cette teneur en lignine de la MOS diminue avec la réduction de la taille des fractions granulométriques, alors que son niveau de dégradation augmente de manière concomitante. Toutefois, la persistance de la MOS est plutôt liée à la stabilisation du COS dans la matrice du sol au travers de ses interactions et associations avec les minéraux du sol (Schmidt et al., 2011, FAO et ITTPS, 2015).

2.6.3.2. *Type de sol*

À l'échelle du paysage, la variabilité spatiale dans la distribution de stocks de COS est aussi à attribuer à la typologie des sols (variations des propriétés le long des versants, aux variations de conditions bioclimatiques et de régime hydrique). Ainsi, selon une étude réalisée en Martinique par Barreteau et al. (2004), les Andosols, bien qu'ils représentent seulement 1% des sols mondiaux, sont les sols les plus riches en COS. La FAO (2018) évoque les tourbières qui présentent une teneur élevée en COS. Les Vertisols et les sols hydromorphes ne sont pas exclus de cette catégorie en raison de la proportion en particules fines du sol qu'ils contiennent (Jobbágy et Jackson, 2000 ; Arrouays et al., 2006 ; Feller et Chenu, 2012).

2.6.3.3. *Propriétés physico-chimiques*

Le COS a une grande influence sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Pallo et al., 2008). Plus les sols sont riches en argiles et en Limon plus ils sont riches en COS. Quelle que soit le type de sol, les particules argilo-limoneuses jouent un rôle prépondérant dans la séquestration de la matière organique (Pallo et al., 2008). Cela s'explique par le rôle protecteur des argiles (Feller et Beare, 1997 ; Arrouays et al., 2006).

2.6.3.4. *Biomasse vivante du sol*

La biomasse vivante à savoir les plantes, la faune et les microorganismes jouent un rôle prépondérant sur la dynamique du COS (Lorenz et al., 2011 ; Dignac et al., 2017). Concernant la biomasse microbienne, elle fait référence à la fraction vivante de la matière organique et considère l'ensemble des microorganismes. L'activité microbienne est aussi le moteur principal du processus de formation d'agrégats stables et constitue, avec les caractéristiques biochimiques, des apports organiques.

Il convient de noter que les plantes, à travers leurs systèmes racinaires, sont à l'origine de la transformation du carbone atmosphérique en composés organiques permettant la construction de biomasse vivante. Elles sont également impliquées dans l'acquisition et l'incorporation de nombreux éléments minéraux du sol (azote, phosphore, potassium, etc.) dans la biomasse vivante et sont ainsi un moteur clé de leurs cycles biogéochimiques (Dignac et al., 2017 ; Sagar et Singh, 2020). Elles participent aux transferts d'eau entre les sols et l'atmosphère. Il convient de noter que de très nombreux facteurs édaphiques influencent la végétation, il s'agit notamment de facteurs physiques (texture, densité, structure, température), de facteurs chimiques (quantité de matière organique, potentiel redox, capacité d'échange anionique et cationique), ou de la disponibilité en eau et en éléments minéraux (Freshet et al., 2018).

La majorité des études ont clairement souligné que les plantes ont un large éventail de systèmes racinaires (Bardgett et al., 2014 ; Demenois et al., 2017 ; Freshet et al., 2018 ; Forster et al., 2020 ; Zhou et al., 2022). Ils rapportent que les systèmes racinaires influencent le statut organique du sol et cette influence varie en fonction de l'espèce végétale et des traits physiologiques racinaires, c'est-à-dire l'architecture, la morphologie, la physiologie, la composition chimique et les associations symbiotiques (Figure 14).

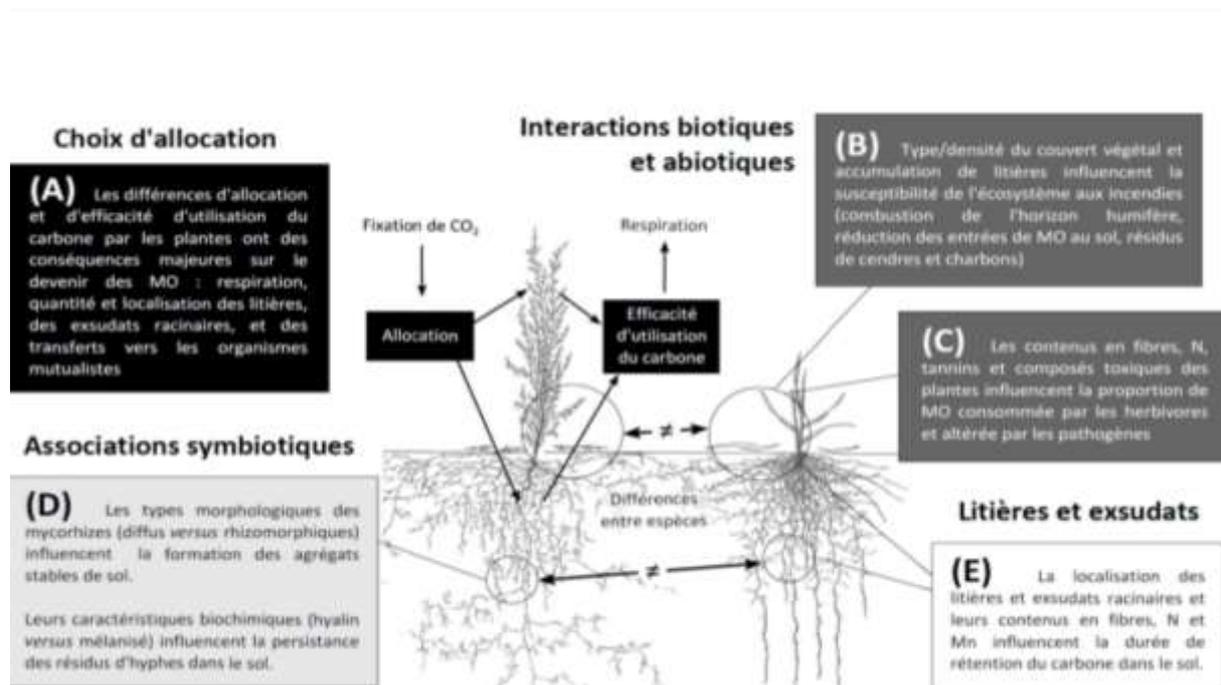


Figure 13: Schémas conceptuel des différences de traits fonctionnels et d'associations symbiotiques entre différentes espèces végétales influençant la stabilisation de la matière organique du sol. Adapté de Freshet et al. (2018).

2.6.3.5. Mode d'usage des terres

En tenant compte du mode d'usage et d'occupation des sols, les stocks de COS les plus faibles sont les stocks des cultures annuelles et ceux les plus élevés sont des stocks issus des prairies permanentes et des forêts (Wasige et al. 2014 ; ADEME, 2004). Ainsi, les systèmes agroforestiers valorisant les cultures des légumineuses peuvent conduire à la résilience fonctionnelle accrue face aux changements climatiques (Malézieux et al., 2009 ; Dorvil et al., 2023). Ainsi, la densité et les diversités taxonomique et fonctionnelle des microorganismes des sols peuvent être modifiées par le type de couverts végétaux, à travers la quantité et la qualité de leurs substrats (les litières végétales, les exsudats racinaires), la richesse en azote du sol (fertilisation, minéralisation des matières organiques du sol et recyclées, besoins de la plante)

et la présence ou non d'organismes symbiotiques. Gérer les MOS c'est gérer un compromis entre la minéralisation et la stabilisation des matières organiques, toutes deux indispensables au fonctionnement du système sol-plante. Ceci est potentiellement facilité par l'usage simultané, dans l'espace et/ou dans le temps, de combinaison d'espèces, ayant des caractéristiques fonctionnelles différents : modes de croissance, allocation de biomasse, caractéristiques chimiques, exploration racinaire (Recous et al., 2017).

2.6.3.6. Topographie

Les stocks de COS sont aussi influencés par la position des peuplements végétaux sur la pente. C'est notamment le cas d'Haïti où les plateaux sont relativement plus boisés. Plusieurs études effectuées en Afrique de l'Ouest ont démontré une relation significative entre les propriétés physico-chimiques du sol et la topo-séquence (Manlay et al., 2004 ; Guo et al., 2006 ; Atchada et al., 2018). Ils ont montré que les stocks de COS diminuaient avec l'altitude et qu'ils étaient fonction de l'inclinaison de la pente, les concentrations les plus élevées se situent en bas de pente en raison des phénomènes de l'érosion et du drainage facilitant la mobilité de la MOS de l'amont vers l'aval où il s'accumule.

2.7. Des pratiques conciliantes fertilités des sols et environnement

Maintenir et/ou augmenter les réserves de COS est crucial pour la réduction des GES. Ce maintien est aussi crucial pour améliorer la fertilité des sols en augmentant la capacité de stockage de l'eau et ainsi favoriser l'accès des plantes à l'eau, augmenter le potentiel de production alimentaire et la résistance face à la sécheresse. Ainsi, Chenu et al. (2019, 2022) ont suggéré sept actions mobilisables en agriculture pour augmenter le stockage de C, voire la fertilité des sols : i) augmenter la photosynthèse réalisée par unité de surface via l'implémentation des cultures intermédiaires, des plantes de couverture, de l'agroforesterie et des prairies temporaires ; ii) réduire les feux ; iii) augmenter la restitution de résidus de culture ; iv) apports d'effluents d'élevage et de produits résiduels organiques ; v) remplacement de la fauche par la pâture ; vi) réduire les pertes de carbone par érosion via l'implémentation de l'agriculture de conservation, l'agroforesterie et les pratiques et aménagements anti érosifs ; vii) réduire les pertes par minéralisation par la réduction du travail du sol (Figure 14).

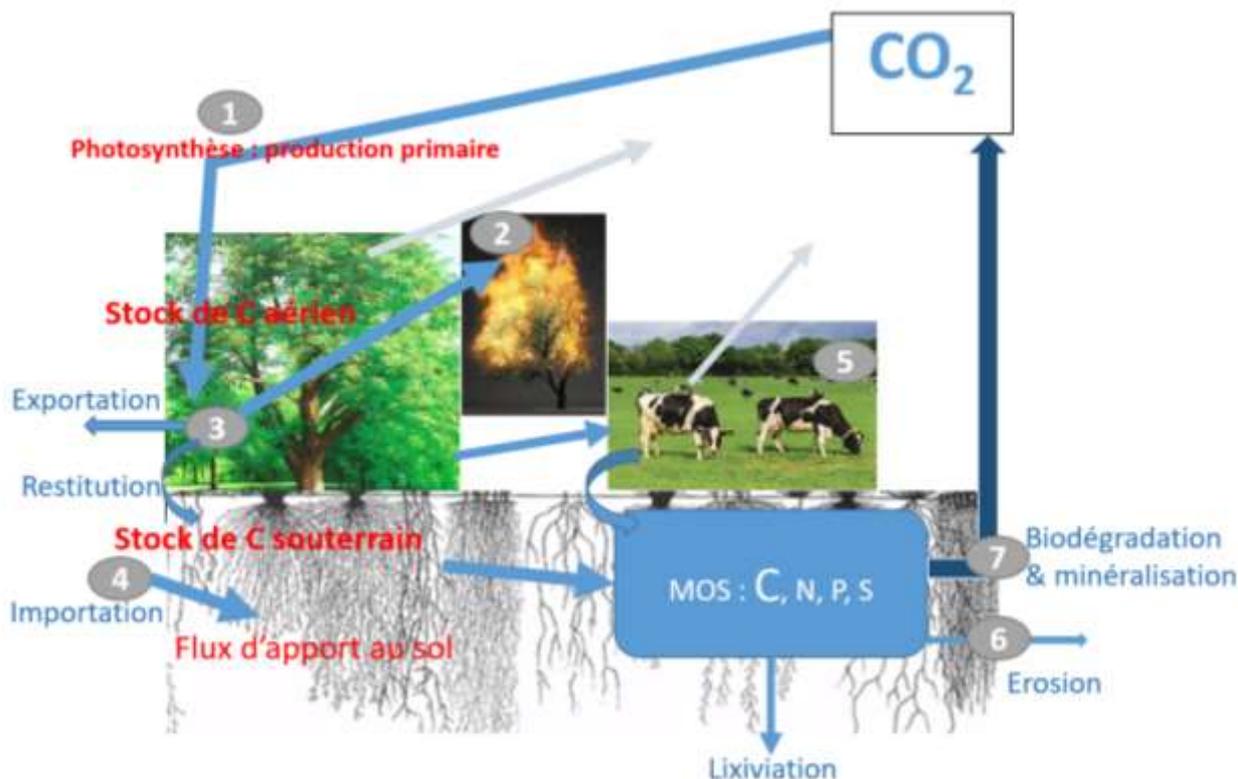


Figure 14 : Dynamiques des MOS du sol et volants d'action pour augmenter les stocks de Carbone dans le sol (adaptée de Chenu et al., 2022).

Encadré 2

Il faut tenir compte du contexte pédoclimatique pour chaque intervention comme : contrôle de l'érosion du sol, maintien d'une couverture du sol; application d'un mode de nutrition intégré ; promotion des systèmes d'agriculture diversifiés; l'amélioration de la gestion des pâturages ; encouragement et soutien des possibilités qu'ont les agriculteurs de gérer le COS ; incitation à la collaboration entre scientifiques, agriculteurs et hommes politiques pour appliquer les stratégies qui augmentent le COS. La mise en œuvre combinée des pratiques qui visent à la fois la conservation du sol et de l'eau comme la diversification des systèmes de culture, l'intégration des systèmes de cultures et d'élevage et l'agroforesterie sont les plus efficaces pour la séquestration du COS et devraient être prioritaires.

CHAPITRE II : CADRE D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

1. Milieu biophysique

1.1 Particularités du milieu physique de Saint-Raphaël

1.1.1. Situation géographique de l'étude

Etiquetée comme grenier du département du Nord d'Haïti et installée à une altitude de 290 à 1127 mètres d'une superficie de 183.853 Km², Saint-Raphaël est l'une des communes du département du Nord et première commune de l'arrondissement de Saint-Raphaël. Elle se trouve à une altitude moyenne de 400 m et est située au 19°17'51,02 N, 72°04'15,17 O. Elle est bornée au Nord par les communes de Grande Rivière du Nord et de Dondon, au Sud par la commune de Maïssade se trouvant dans le département du Centre, à l'Est par les communes de Bahon (au Nord-est) et de Pignon (au Sud-est) et à l'Ouest par la commune de Saint Michel de l'Attalaye située dans le département de l'Artibonite (Figure 15). Elle s'étend dans un fond de la vallée au bord de la rivière de Bouyaha.

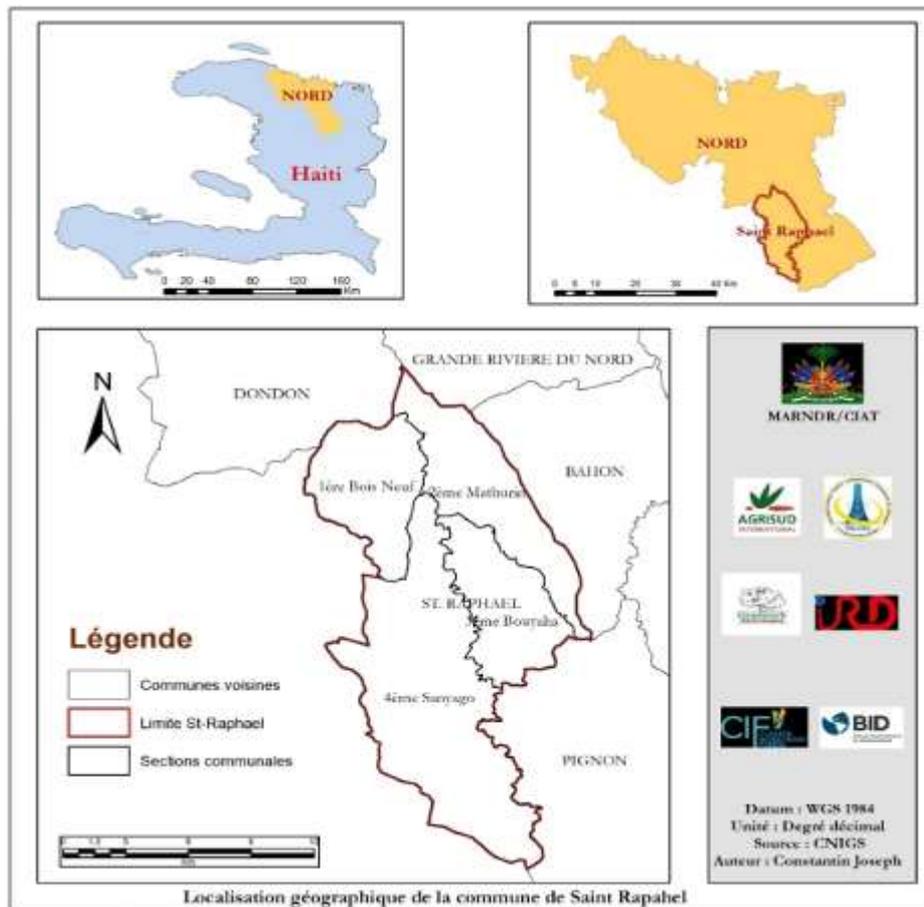


Figure 15 : Localisation géographique de la commune de Saint-Raphaël

1.1.2. Contexte bioclimatique

1.1.2.1. Climat

Le climat, de type tropical Aw maritime (Peel et al., 2007), tempéré et uniformisé par l'alizé, il 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. De 2002 à 2021 la pluviométrie moyenne annuelle enregistrée est de 1098 mm (Station de Saint-Raphaël) (Figure 16). 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.

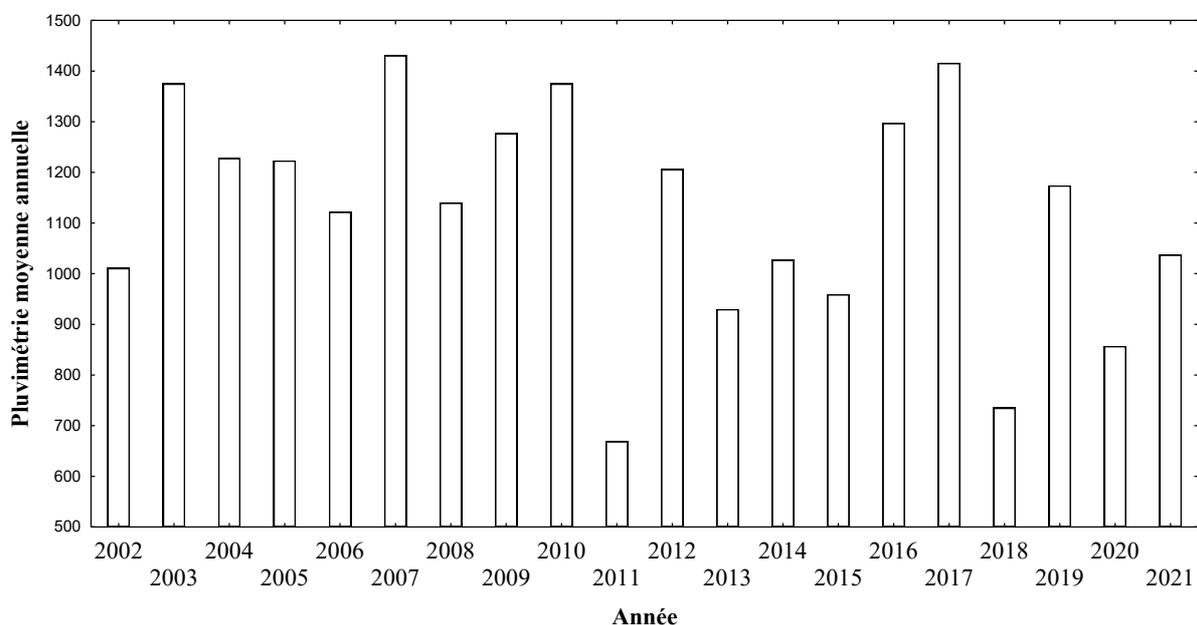


Figure 16 : Pluviométrie moyenne annuelle de la commune de Saint-Raphaël (2002-2021).

1.1.2.2. Végétation

À Saint-Raphaël, trois strates de végétation sont observées: la strate arborée, la strate arbustive et la strate herbacée. Les espèces arboricoles dominantes sont principalement *Mangifera indica*, *Persea americana*, *Catalpa longisima*, *Simaruba glauca*, *Roystonea regia*, *Melicocus bijugatus*, *Samanea saman*, *Terminalia catappa*, *Guarea trichilioides*, *Inga vera*, *Sweitena mahagoni*, *Ura crepitans*, *Anona squamosa*. Les zones de végétation naturelle, positionnées surtout dans les versants, sont dominées par des poches arborées formées spécialement des arbustes : *Spondias monbin*, *Bursera simaruba* et *Prosopis juliflora* identifiées au niveau des flancs de collines et des crêtes des montagnes. En plus de ces trois espèces arbustives dominantes peuvent se inventorier les espèces suivantes: *Coccoloba uvifera*, *Leucaena*

leucocephala, *Hematoxila campechianum*, *Coccalaba uvifera*, *Paspalum fibriatum*. En ce qui a trait aux herbacées, elles sont formées d'une bonne partie des plantes cultivées et des peuplements enherbés observés dans des zones de pâturages permanents comme : l'herbe Madan Michel (*Themeda quadrivalvis L.*), *Paspalum fibriatum*, *Panicum maximum* et *Cynodon dactylon*. La (Figure 17) présente une vue générale du peuplement végétal de Saint-Raphaël.



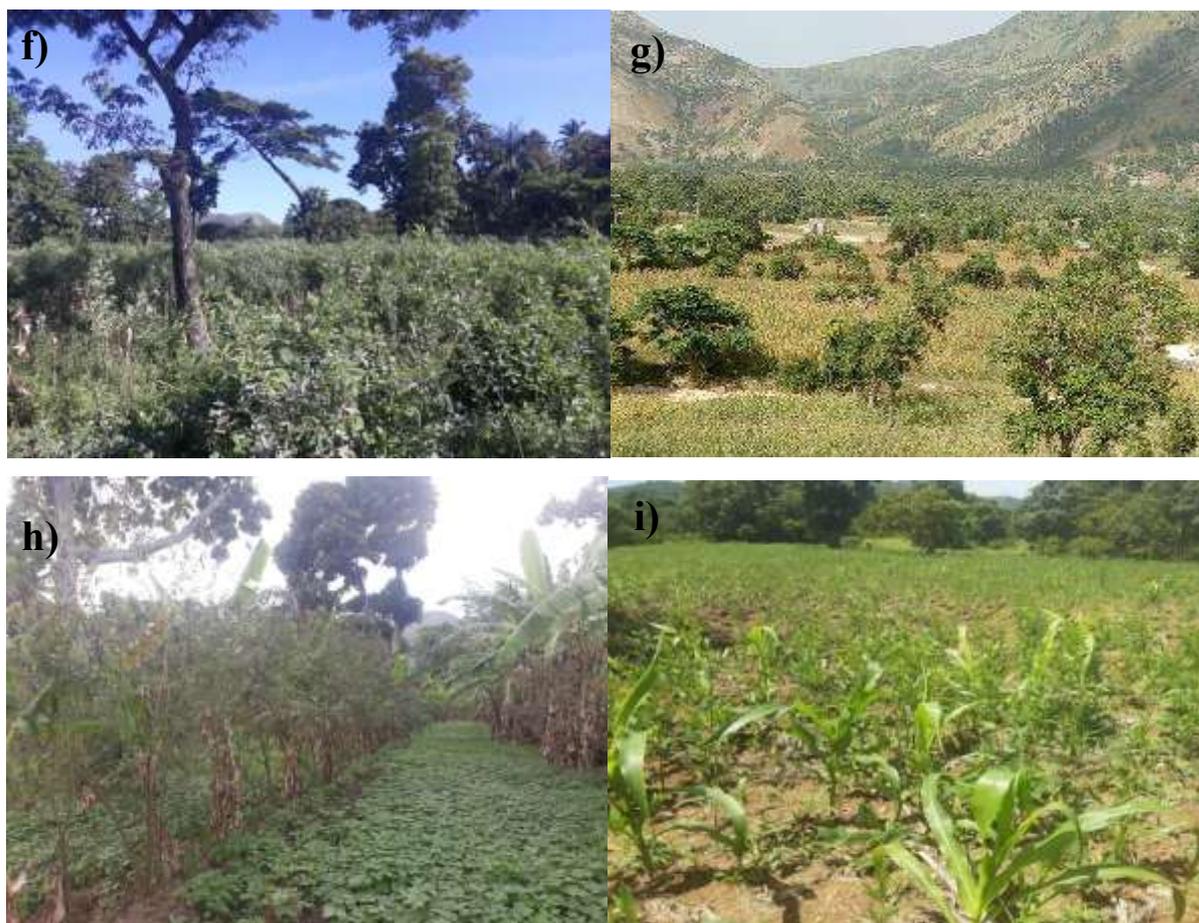


Figure 17 : Contexte végétal de la Commune de Saint-Raphaël: (a) et (b) Végétation naturelle/pâturage permanent ; (c) Montagne dégradée (depuis 25 ans selon les agriculteurs) ; d) plateau irrigué soumis aux cultures du riz et des cultures maraîchères ; (e), (f), (g) Agroforesterie (tout type confondu) ; h) et i) plateau non irrigué sous pratiques semi-intensives (association pois congo, haricot, gombo, maïs).

1.1.2.3. Contexte géologique

Située dans le nord de l'arc caribéen, la commune de Saint-Raphaël est établie sur de formations géologiques multiples. Il s'agit d'un complexe géologique formé d'une mosaïque de calcaires durs, de dépôts d'alluvions, de marnes et sables et de calcaires marneux. Les lithologies sont dominées par des matériaux sédimentaires calcaires, des calcaires massifs et crayeux de l'Éocène, des calcaires crayeux de l'Oligocène, des marnes du Miocène. Certaines zones, notamment les sections de Bois Neuf et Mathurin sont localisées sur des structures géologiques de types calcaires durs. Cependant, il existe des micro-zones agroécologiques au niveau desquels les structures géologiques sont formées de marnes et de calcaires marneux, c'est notamment le cas du plateau de Sanyago et une partie du plateau de Bouyara (Figure 18). Les

soils rencontrés au niveau de ces zones présentent le plus souvent des couleurs noires et brunes, et dans certains cas, ils présentent un aspect rougeâtre (hauteur de Mathurin). Les matériaux volcaniques sont présents au nord mais ne constituent pas une occurrence importante.

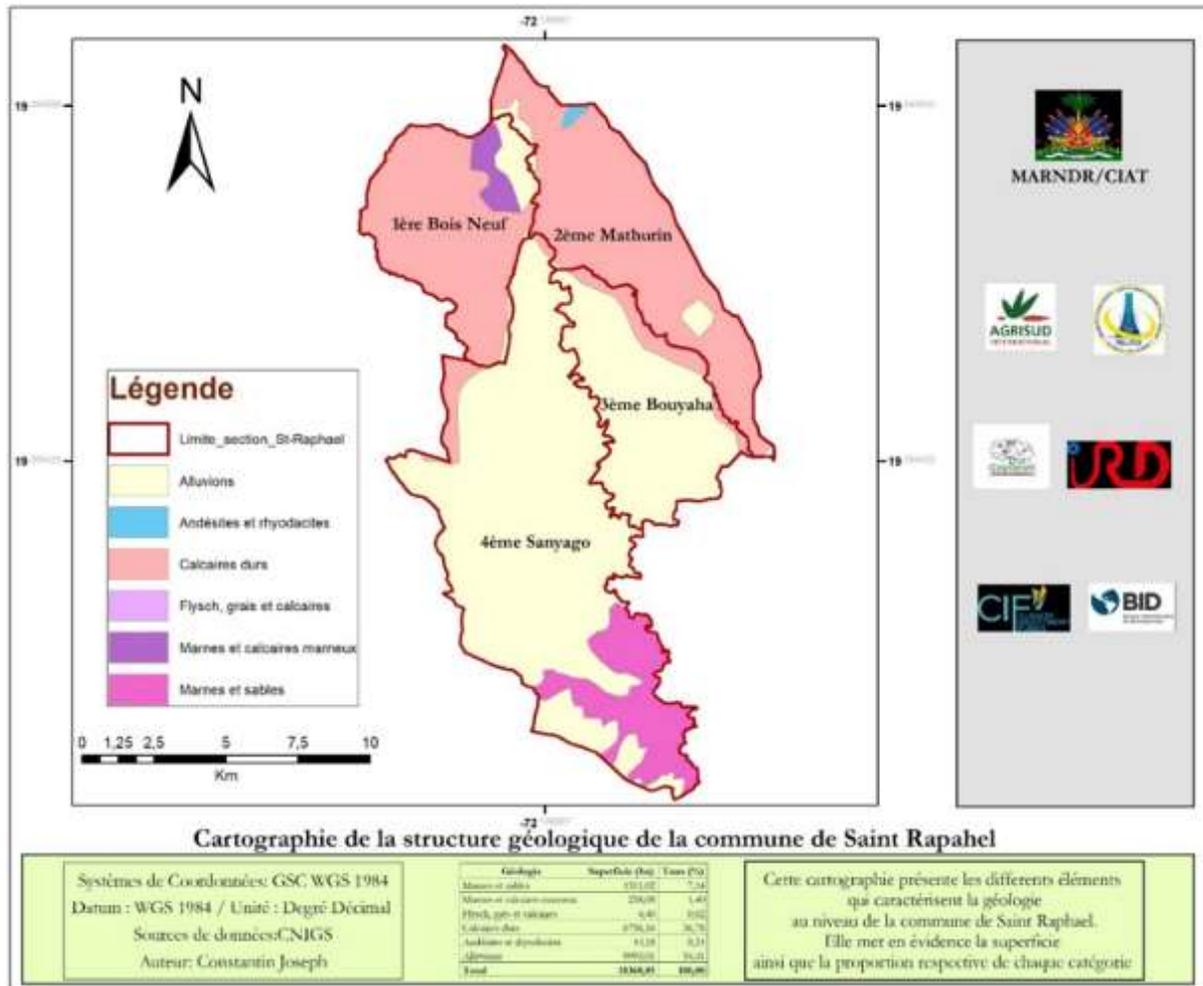


Figure 18 : Cartographie des principales lithologies de la commune de Saint-Raphaël

1.1.2.4. Contexte hydrologique

La commune de Saint-Raphaël est caractérisée par un réseau hydrographique spatialement très important et très riche en termes d'affluence (Figure 20). Elle se trouve au cœur du bassin versant de la rivière de Bouyaha occupant 135 km² de superficie, un cours d'eau très important au niveau de la zone. Cette rivière traverse la commune en partant du Nord jusqu'au Sud en continuant son parcours pour aller se joindre à la rivière Canot puis se jeter dans la rivière de Guayamouc. L'axe du drainage s'oriente du Nord au Sud. D'une longueur de 34, 88 km entre le Nord et Sud de la commune et d'un débit d'étiage de 1000 l/s, c'est cette portion de la rivière qui alimente le principal système d'irrigation de Saint-Raphaël (construit entre 1949 et 1951), notamment au niveau de la section Sanyago. Outre le système d'irrigation principal, Saint-

Raphaël est dotée de deux autres systèmes d'irrigation dont le système de Merlaine (300 ha) construit en 1991 au niveau de la source Merlaine et celui de Buenabite (50 ha) construit en 1998 à partir de la source Lamerchie (CHCL et al., 2020). Au nord de la commune, c'est-à-dire en amont de la partie du réseau traversant la commune, une concentration plus importante d'affluents du cours principal est observée : ravine Marie Jeanne, ravine Bois Neuf, ruisseau Wallondry et ravine Compas (Figure 19). Dans l'extrême Sud de la commune, zone d'observation des plateaux secs, une moins importante affluence est remarquée : la ravine (permanente) sable représente l'unique cours de ce réseau.

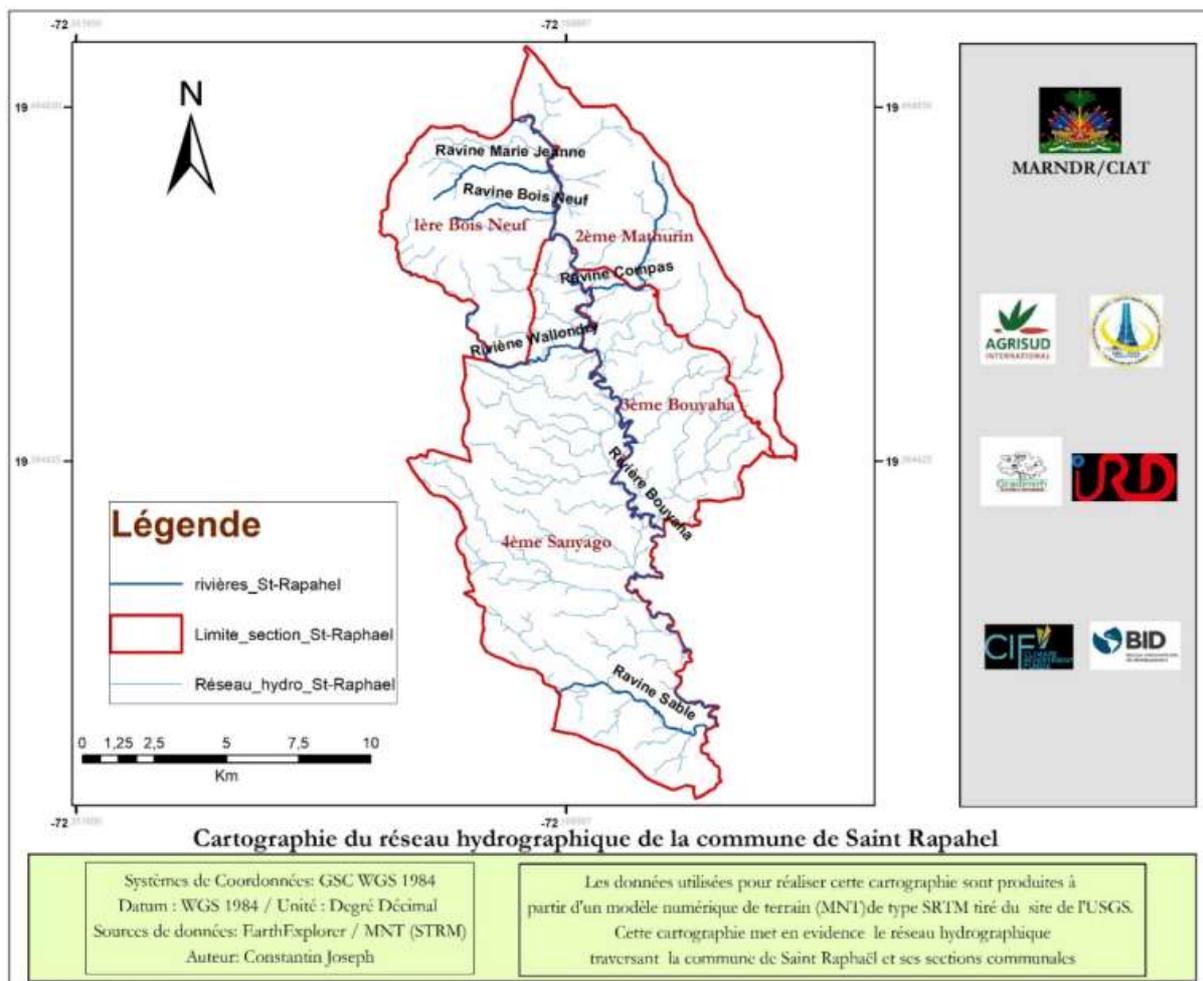


Figure 19 : Carte du réseau hydrographique de Saint-Raphaël

1.1.2.5. Contexte pédologique

Les sols de la couverture pédologique peuvent être rattachés aux Leptosols et aux Régosols sur les versants calcaires, aux Vertisols et Gleysols dans les situations des plateaux. Des Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols (RELEC) sont également observées sur affleurements calcaires des vallées de Bois Neuf et de Mathurin (IUSS-WRB, 2014). Les Haplic Cambisols

(Eutric ou Calcaric) se rencontrent dans les versants de la section Mathurin (Figure 20). Les bas de versants présentent des situations variées, mais l’ambiance géochimique est dominée par les carbonates.

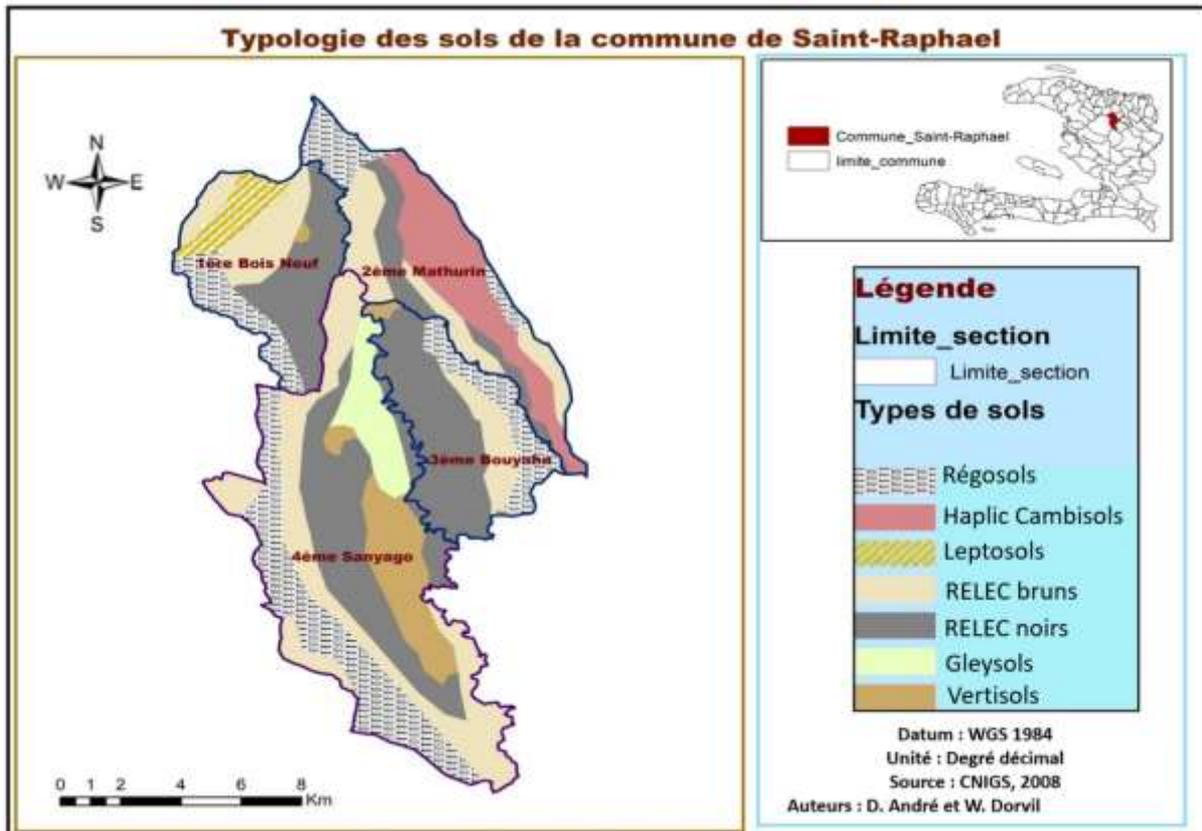


Figure 20 : Typologie des sols de la commune de Saint-Raphaël

Le relief de Saint-Raphaël varie d’une section à l’autre. Le contexte naturel est favorable aux phénomènes érosifs : on y trouve très peu de pratiques traditionnelles de conservation et d’amélioration de la fertilité dans les champs arborés situés à proximité immédiate des cases, à un moindre degré, dans les champs proches clôturés de haies vives (Dorvil et al., 2023). Mais ces pratiques ne concernent qu’une surface.

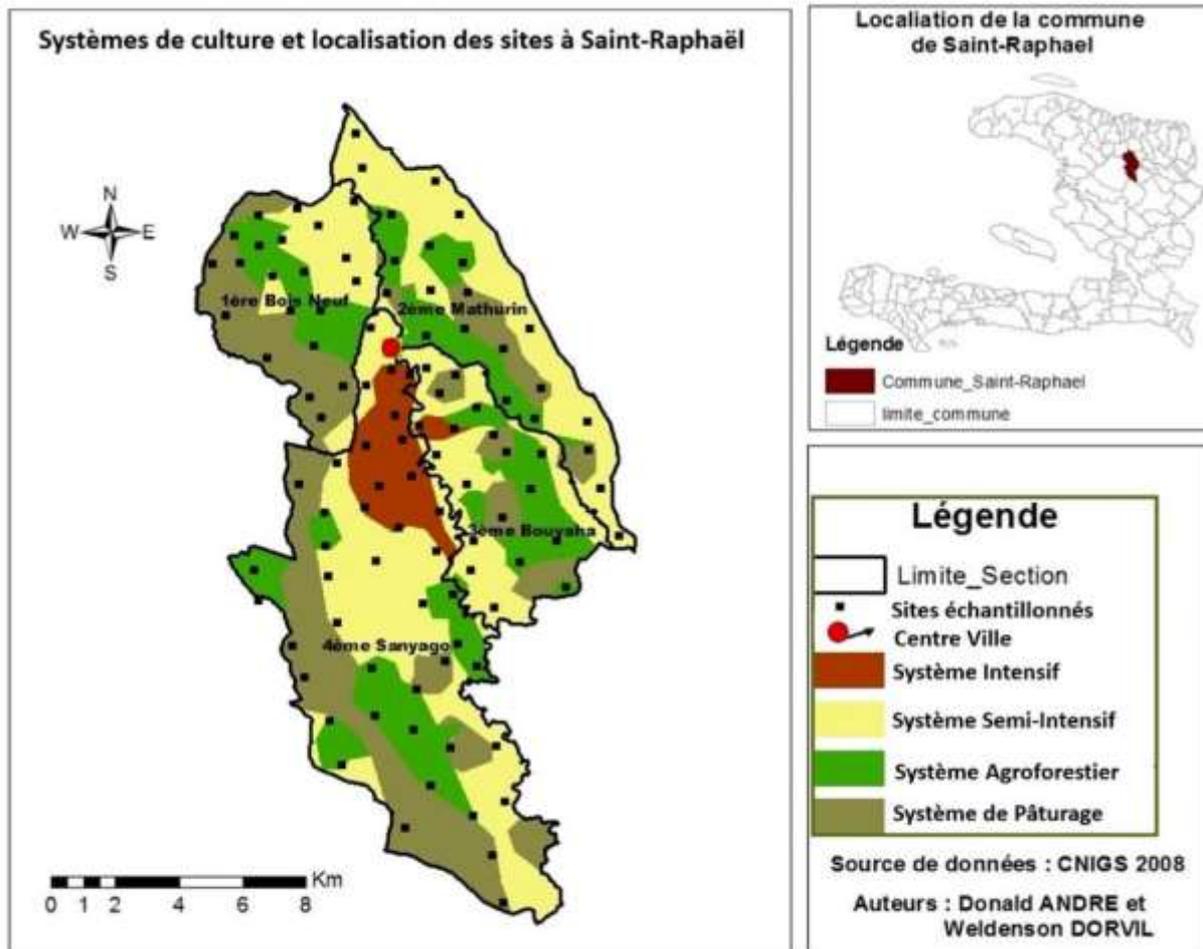
1.1.2.6. Choix des parcelles d’études

En 2019, après la réalisation du diagnostic des systèmes de production par le consortium, 78 parcelles paysannes appartenant à 78 exploitations agricoles représentant la diversité des combinaisons entre les caractéristiques morphopédologiques, les successions culturales et les conduites de cultures ont été sélectionnées. Outre ces 78 parcelles, 12 parcelles additionnelles consacrées pour la description des profils pédologiques à un mètre de profondeur ont été ajoutées. Ces 90 parcelles ont fait l’objet de trois campagnes d’observation-descriptions et de prélèvements d’échantillons de sols. Ces parcelles d’études ont été choisies suivant un

compromis entre les systèmes de culture identifiés, la couverture pédologique, la couverture géographique et la faisabilité de l'implantation. Ainsi, 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) (Figure 21).

Encadré 3

En résumé des paysages de Saint-Raphaël se présentent comme une mosaïque orientée Nord-Sud, fortement carbonatée, avec des reliefs déforestés, érodés, des pentes assez fortement sujettes à l'érosion et des portions larges de paysages à pentes presque nulles dans l'axe de la vallée de la rivière de Bouyara. Si les contraintes sont moindres dans la vallée, les versants et les portions de plateau sont soumis à des contraintes de sécheresse au cours du carême, alors que dans la vallée les sols présentent souvent des caractères prononcés en hydromorphie.



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

Figure 21 : Distribution des systèmes de cultures et localisation des sites inventoriés.

2. Matériels utilisés

2.1. Matériels Matériels de terrain

- Fiches : pour la description des profils de sols de RMQS2 et 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 la mesure de la densité apparente totale et en terre fine ;
- 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 dérivée de la méthode de sable ;
- gallons : pour apporter de l'eau ;
- téléphone/caméra : pour la prise des photos.

2.2. Matériels 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 ;
- 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, H₃PO₄, CaCO₃...
- Agitateurs magnétiques : 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, microplaque, réactifs divers...

3. Stratégie d'échantillonnage et méthodes analytiques

3.1. Méthodes de terrain

3.1.1. Échantillonnage

L'échantillonnage a été effectué par strates d'épaisseur fixes jusqu'à 100 cm. Une fosse pédologique a été ouverte au milieu de chaque parcelle. 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 et, ont été répartis ainsi : 299 échantillons

composites aléatoires, 25 répétitions aléatoires par parcelle, ont été prélevés pour les couches 0-30 cm et 30-50 cm lorsque la pierrosité le permettait (GIEC, 2006) et, 46 échantillons composites (deux répétitions au moins) ont été prélevés pour la couche 50-100 cm. 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. 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 agraire. 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. La fosse pédologique est incluse dans les 25 répétitions effectuées pour constituer l'échantillonnage (Figure 22). Ces profondeurs ont pu être réduites en cas de forte pierrosité (GIEC, 2006, ISO 23400). 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.



Figure 22 : Prélèvement des sols par la méthode de composites

3.1.2. Mesure de la densité apparente

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 cm^3 ; $87,5 \text{ cm}^3$; $222,5 \text{ cm}^3$) selon les couches et les contraintes du terrain de 0 à 50 cm. 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), les prélèvements ont été effectués suivant quatre strates d'épaisseur avec au moins 2 répétitions par strates : 0-10 cm, 10-30 cm, 30-50 cm et 50-100 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 h de séchage à 105 °C. La D_a sèche totale est exprimée en g cm^{-3} (Figure 23).



Figure 23 : Prélèvements des sols pour la mesure de la densité apparente : a) méthode à l'eau ; b) méthode de cylindre

3.2. Méthodes d'étude au laboratoire

3.2.1. Dosage de la teneur en carbone organique total (COT) et d'azote total (Nt) par la méthode de CHN

Les mesures de la concentration en carbone total (CT) et d'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, FISO NS EA 1108 (NF ISO 10694 et NF ISO 13878)]. 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 (CaCO_3) permet de calculer la fraction inorganique (CIT) du carbone total de l'échantillon si l'on suppose que le carbone inorganique provient exclusivement du CaCO_3 . 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) (Figure 24). Le carbone organique total (COT) a été calculé à partir de la formule :

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



Figure 24 : Décarbonation au calcimètre de Bernard pour la mesure de la teneur en carbone organique total (COT) par la méthode CHN (Laboratoire de l'UMR Eco&Sol, Montpellier) : a) Calcimètre de Bernard ; b) et c) : préparation des échantillons de sol de la solution.

3.2.2. Mesure des stocks de COS des couches 0-30 cm, 0-50 cm et 0-100 cm

Le COT total pour les 100 cm de profondeur du sol résulte de la moyenne des COT pour les couches 0-30 cm, 30-50 cm et 50-100 cm.

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

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

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.

De même, pour les échantillons composites (85), la décarbonatation (UMR FARE 614 Réf : MO-SOL-CHI-5-v3 Version : v3) a été effectuée par l'attaque de l'acide phosphorique à 85% dilué au 1/5 au laboratoire du CHCL (Figure 25).

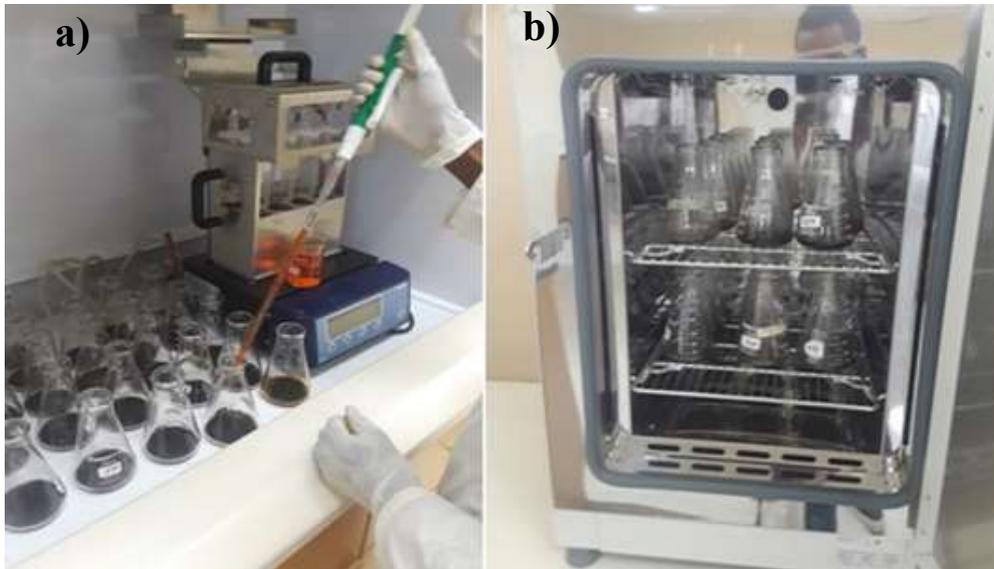


Figure 25 : Décarbonatation des sols pour le dosage de la MOS par la méthode Walkley & Black (Laboratoire de Sol à CHCL, Haïti) : a) attaque des échantillons de sol à l'acide phosphorique 85% ; b) séchage à 60 °C des échantillons à l'étuve après décarbonatation.

3.2.3. 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 (Dabin et al., 1967).

3.2.4. 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 Duncan ont été effectuées pour tester et afficher le niveau de confiance à 95%. Le test de Fisher LSD a été ajouté en vue de montrer des différences significatives pour les teneurs en carbone organique pour la couche 0-50 cm.

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).

**CHAPITRE III : CARACTERES MORPHOLOGIQUES DES SOLS
ÉCHANTILLONNÉS**

1. Introduction

A Saint-Raphaël, cinq grands types de sols ont été inventoriés : des Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols (RELEC), Vertisols, Régosols, Leptosols et Haplic Cambisols. Sur un total de 90 profils pédologiques étudiés, 21 fosses pédologiques ouvertes à un mètre de profondeur au moins ont été étudiées (juin à août 2023). Ainsi, la description de huit d'entre elles sera présentée dans les lignes qui suivent (Maignen R. 1980 ; Jolivet et al., 2018 ; ISO 23400, 2021). Ces profils sont répartis de part et d'autres dans les différents systèmes de culture étudiés à travers les quatre sections communales et suivant les différentes situations topographiques en tenant compte également de la nature des sols. Cette zone, faisant l'objet de la première étude relative au stock de carbone organique du sol, présente une grande hétérogénéité de sols tant du point de vue de la composition que des propriétés physiques. D'ailleurs c'est l'une des raisons du choix de cette zone d'étude par le Ministère de l'Agriculture, car elle recouvre la majorité des unités agroécologiques du pays à travers ses caractéristiques pédoclimatiques et des systèmes de culture qui y sont inventoriés (Chapitre 4).

2. Description des profils pédologiques à Saint-Raphaël

2.1. Le profil d'un sol localisé à hauteur de pente : cas d'un Rendzic Leptosol

Dans ce profil, le couvert végétal est peu dense. Des fourmilières et termitières épigées et arboricoles sont peu présentes à proximité du profil. Hormis l'horizon de surface, le sol montre une très faible différenciation verticale. La couleur varie progressivement avec la profondeur (Figure 26). En surface (0-30 cm), la macrostructure est composée d'agrégats peu nets de taille ne dépassant pas un centimètre. La couleur grise/brune de l'horizon de surface (mince) est due à la présence de la matière organique assurée par la décomposition de la matière organique végétale durant la période de jachère. Les Tableaux 6, 7, 8 présentent respectivement le milieu biophysique, les caractères généraux et la description des horizons du profil.

Tableau 6 : Milieu biophysique du profil de Rendzic Leptosol

Segment concave à pente moyenne non cultivé, sols peu épais sur matériaux carbonatés sableux	
Dynamique morphologique	Versant
Forme morphologique	Colline
Importance de la pierrosité	Abondance de galets et de sables grossier en surface
Érosion	Vue en surface à petite échelle
Superficie totale	50 ha
Pente	35%
Matériaux d'origine	Calcaire sableux
Occupation du sol	Pâturage permanent (arbustes éparses et herbes)
Formation végétale	Herbes et peu d'Arbustes (2 à 3 arbres à l'hectare)
Activité biologique	Fourmilières et termitières épigées et arboricoles peu nombreuses
Profondeur utile du sol	25/30 cm
Présence de carbonates	Basique
Drainage externe	Fort
Risque d'inondation	Nul
Variabilité	Moyenne
Informations complémentaires	Pas de structures antiérosives, quelques arbres sont observés sont observés. Versants positionnés face l'Est.

Tableau 7 : Caractères généraux du profil de Rendzic Leptosol

Ident du profil	BN1 (Bois Neuf)
Profil amont	Oui
Localisation	Aire École nationale
Date	23 juillet 2023
Altitude (m)	500 m
Localisation sur le segment	A mi-hauteur du segment
Position sur le versant	A mi-hauteur du versant
Estimation du drainage interne	Drainé
Estimation perméabilité	Forte en surface
Profondeur utile cm	25-30
Classification WRB	Rendzic Leptosol
Occupation/Utilisation du sol	Quelques arbres dispersés (manguiers), terres non travaillées
Discontinuité	Discontinuité à 25-30 cm avec apparition du calcaire sableux
Organisation géologique	Profil monolithique (cela veut dire qu'il y a 1 seul matériel parental)
Pierrosité de surface	Importante (présence de pierres)

Tableau 8 : Tableau : Description des horizons du profil

<p>0-25/30 cm</p>	<p>Couleur (sec) : gris - brun (10YR5/2) ; Taches : absence de taches ; Éléments grossiers : sable grossier en surface oui , cailloux et pierres , galets ; Texture sableuse ; Structure : grumelleuse fine ; Activité biologique : pas d'activité biologique identifiée ; Porosité : très Poreux ; Fragile : oui ; Friable ; Enracinement : nombreuses et denses, racines fines et moyennes de graminées en surface ; Teneur en matière organique : sans doute assez forte, restes invisibles , très altérée ; Transition : nette ondulée</p>
<p>25/30-100 cm</p>	<p>Couleur (sec) : brun clair à blanc (10YR8/1) avec Taches : polychromes (blanc, jaune, brun) fines, contrastées et nettes ; Éléments grossiers : faible (1%); Texture : sableuse avec sables fins ; Structure : massive ; Effervescence : nette généralisée ; Activité biologique : nulle, pas d'activité biologique identifiée ; Porosité : Poreux autour des racines avec des agrégats subanguleux centimétriques ; Fragile ; Friable ; Enracinement : peu nombreuses, racines fines et moyennes.</p>



Figure 26 : Rendzic Leptosol situé à hauteur de pente : a) Prise d'échantillons pour mesure de densité apparente et face échantillonnée pour la description globale du profil et b) fosse pédologique et son environnement.

2.2. Le profil d'un sol localisé en vallée sous l'agroforesterie : Cas d'un Calcic Cambisol

Ce profil est localisé sous une végétation dense dominée par les arbres fruitiers et de cacaoyers. Les cultures de banane, d'igname sont les plus remarquées. Le sol présente une forte différenciation verticale. En surface, on observe une forte porosité due à l'abondance des racines fines et grossière orientées verticalement. En profondeur, aucune porosité n'est présente. Globalement l'eau circule dans les fentes et surtout entre les agrégats. En effet, dans les agrégats, la porosité estimée à l'œil nu reste faible, soit 5-6 pores au centimètre carré. Dans les 15 premiers centimètres de profondeur du sol, la macrostructure est composée d'agrégats polyédriques peu nets de taille d'environ 5 cm en moyenne. Ces agrégats se débitent en agrégats sub-anguleux à arrondis de plus petite taille 1 cm. La couleur noire de l'horizon de surface est due à la présence de la matière organique. Par contre, la microstructure est très peu représentée en surface. Elle est surtout représentée en profondeur (Figure 27). Les Tableaux 9, 10, 11 présentent respectivement le milieu biophysique, les caractères généraux et la description des horizons du profil.

Tableau 9 : Milieu biophysique du profil de Calcic Cambisol

Segment concave à pente moyenne non cultivé, sols peu épais sur matériaux carbonatés sableux	
Dynamique morphologique	Vallée
Forme morphologique	Vallée
Importance de la pierrosité	Présence de galets en surface pédologique mais très profond
Érosion	Non vue
Superficie totale	Plus de 25 ha
Pente	2%
Matériaux d'origine	Calcaire
Occupation du sol	Agro-forêt
Formation végétale	Abondance d'arbres, de cacaoyers et des cultures ombrophiles (banane, Taro, Igname)
Activité biologique	Fourmilières et termitières épigées et arboricoles nombreuses ; vers de terre abondants
Profondeur utile du sol	70 cm
Présence de carbonates	Basique
Drainage externe	Fort
Risque d'inondation	Nul
Variabilité	Forte, discontinuité en profondeur
Informations complémentaires	Sol très profond, activité biologique élevée et abondance racinaire

Tableau 10 : Caractères généraux du profil de Calcic Cambisol

Ident du profil	BN/N4 (Bois Neuf)
Profil amont	Oui
Localisation	Près de l'EDH, rive gauche de la route nationale # 3
Date	23 juillet 2023
Altitude (m)	398 m
Localisation sur le segment	Vallée
Position sur le versant	Vallée
Estimation du drainage interne	Drainé
Estimation perméabilité	Très forte en surface
Profondeur utile cm	50 cm
Classification WRB	Calcic Cambisol
Occupation/Utilisation du sol	Cacaoyer et des espèces arboricoles
Discontinuité	Discontinuité à 70 cm
Organisation géologique	Profil monolithique (cela veut dire qu'il y a 1 seul matériel parental)
Pierrosité de surface	Moyenne

Tableau 11 : Description des horizons du profil

0 – 45/50 cm	Couleur (sec) : Noir (2.5Y4/8) ; Taches : absence de taches ; Éléments grossiers : sable grossier en surface , cailloux et pierres, galets ; Texture sableuse ; Structure : grumeleuse ; Activité biologique : forte activité biologique identifiée ; Porosité : très Poreux ; Fragilité : non, peu Friable ; Enracinement : nombreuses et denses, orientation verticale et horizontale (inter mais surtout intra agrégats) ; Teneur en matière organique : sans doute forte, visible , très altérée ; Transition : peu nette ; Effervescence : élevée
45/50-70 cm	Couleur (sec) : Noir (2.5Y4/8) avec Taches jaunes ; Éléments grossiers : faible; Texture : argileuse ; Structure : grumeleuse Effervescence : moyenne ; Activité biologique : toujours élevée ; Porosité : Poreux ; Fragile ; Friable ; Enracinement : nombreuse, orientation verticale. Transition : très nette à l'horizon sous-jacent
70-120 cm	Couleur : brune avec quelques taches noires (10YR5/3) ; Pierrosité : Peu Caillouteux ; Effervescence : élevée ; Structure massive ; Texture : sableuse dans l'ensemble ; Netteté : très nette ; Compaction : peu compact ; Activités biologiques : nulle ; Fragilité : Fragile ; Plasticité : non ; Adhésivité : non ; Présence des racines : peu Répartition moins homogène, moins abondantes, très fines (< 1mm), verticales, présentes jusqu'en profondeur de 170 cm.



Figure 27 : RELEC localisé en vallée soumis à l'agroforesterie : a) vue globale de la fosse pédologique ; b) face échantillonnée pour les caractéristiques globales et vue globale de la taille des agrégats/ prise d'échantillons pour mesure de densité apparente et face échantillonnée pour la description globale du profil et c) environnement du profil.

2.3. Le profil de sol localisé à mi pente : Cas d'un Rendzic Leptosol

Ce profil est localisé sous une végétation naturelle dominée par des espèces xérophiles (Bayahonde, gommier). Caillouteux dans l'ensemble avec un plus grand dépôt en profondeur, le sol présente peu de différenciation verticale. En surface, on observe une porosité plus ou moins bonne due à l'abondance des cailloux et des racines fines et orientées verticalement. En profondeur (au-delà de 25 cm), aucune porosité n'est présente (cailloux dans l'ensemble). En effet, dans les agrégats, la porosité estimée à l'œil nu reste faible, soit 3 pores au centimètre carré. Dans les 10 premiers centimètres de profondeur du sol, la macrostructure est composée d'agrégats polyédriques peu nets de taille d'environ 1-2 cm en moyenne. Ces agrégats se débitent en agrégats sus-anguleux à arrondis de plus petite taille 1 cm. La couleur noire de l'horizon de surface (très mince) est due à la présence de la matière organique assurée par la décomposition de la matière organique végétale et animale en raison du pâturage permanent (élevage libre). Il n'existe pas de microstructure en surface. Elle est surtout représentée en profondeur (Figure 28). Les Tableaux 12, 13, 14 présentent respectivement le milieu biophysique, les caractères généraux et la description des horizons du profil.

Tableau 12 : Milieu biophysique du profil de Rendzic Leptosol positionné au versant

Segment concave à pente moyenne non cultivé, sols peu épais sur matériaux carbonatés sableux	
Dynamique morphologique	Versant
Forme morphologique	Colline
Importance de la pierrosité	Vue en surface à large échelle
Érosion	Vue en surface à petite échelle
Superficie totale	Plus de 100 ha en continu
Pente	55%
Matériaux d'origine	Calcaire sableux
Occupation du sol	Cultures saisonnières (maïs-pois inconnus-pois-congo)
Formation végétale	Arbustes éparses
Activité biologique	Fourmilières et termitières épigées et arboricoles peu nombreuses
Profondeur utile du sol	20/30 cm
Présence de carbonates	Basique
Drainage externe	Fort
Risque d'inondation	Elevé
Variabilité	Faible
Informations complémentaires	Pas de structures antiérosives, quelques arbres sont observés sont observés. Versants positionnés face l'Est.

Tableau 13 : Caractères généraux du profil du Rendzic Leptosol

Ident du profil	BN2 (Bois Neuf)
Profil amont	Oui
Localisation	Aire École nationale
Date	22 juillet 2023
Altitude (m)	650 m
Localisation sur le segment	A mi-hauteur du segment
Position sur le versant	A mi-hauteur du versant
Estimation du drainage interne	Drainé
Estimation perméabilité	Forte en surface
Profondeur utile cm	25-30
Classification WRB	Rendzic Leptosol
Occupation/Utilisation du sol	Quelques arbres dispersés (manguiers), terres non travaillées
Discontinuité	Discontinuité à 25-30 cm avec apparition du calcaire sableux
Organisation géologique	Profil monolithique (cela veut dire qu'il y a 1 seul matériel parental)
Pierrosité de surface	Abondance de galets et de sables grossier en surface

Tableau 14 : Description des horizons du profil

0-20/25 cm	Couleur (sec) : gris - brun (10YR5/2) avec de nombreuses taches noires; Pierrosité : caillouteux ; apparemment riche en MOS ; On observe une discontinuité entre les 2 horizons en termes d'abondance en cailloux et de la richesse en MOS ; Limite : nette ; Structure : grumeleuse; Pas d'eau libre dans la porosité donc pas de saturation complète des horizons ; porosité : très poreux ; Effervescence : très élevée ; Activité biologique : peu ; Limite nette ; Racines : Présence des racines des graminées et plus abondantes en surface ; Pas de discontinuité porale entre les 2 horizons, Racines fines plus abondante en surface.
20/25 – 100 cm	Couleur : blanc (10YR 8/1) ; Abondance des pierres arrondies (gros galets dur) ; Humidité : Sèche dans l'ensemble ; Texture : sableuse avec la présence de pierres de plus grande taille ; Quelques traces de vie coincées à proximité des cailloux.



Figure 28: Leptosol localisé à mi pente soumis au pâturage a) vue globale de la fosse pédologique ; b) face échantillonnée pour les caractéristiques globales, prise d'échantillons pour mesure de densité apparente et face échantillonnée pour la description globale du profil et c) environnement du profil.

2.4. Le profil de sol localisé au piedmont sous Pâturage : cas d'un Cambisol.

Ce profil est localisé au piémont d'un versant boisé sous une végétation pionnière dominée par des herbacées avec quelques rares de pieds de Bayahonde (*Prosopis juliflora*). Caillouteux dans l'ensemble avec un plus grand dépôt en profondeur (Figure 29), le profil de sol présente de différenciation verticale avec un horizon 2 moins caillouteux par rapport au premier et au troisième horizon de ce même profil. En surface, on observe une porosité plus ou moins bonne due à l'abondance des cailloux piégeant la matière organique et de fourmilières, des petites galeries de vers de terre, de turricules et des racines majoritairement fines orientées verticalement. D'où une vitesse d'infiltration de 186 ml a été enregistrée suivant le test de Beerkan. En profondeur (au-delà de 25 cm), une faible porosité est constatée avec la présence de quelques racines de dimension moyenne. Toutefois, peu de galets sont observés dans cet horizon. En effet, dans les agrégats, la porosité estimée à l'œil nu reste faible, soit 4 pores au centimètre carré. Dans les 10 premiers centimètres de profondeur du sol, la macrostructure est composée d'agrégats polyédriques peu nets de taille d'environ 2-5 cm. Ces agrégats se débitent en agrégats sub-anguleux à arrondis de plus petite taille 1 cm. La présence des turricules et des petites galeries de vers de terres ainsi que celle de fourmies indique la présence de la matière organique assurée par la décomposition de la matière organique végétale et animale en raison du pâturage permanent (élevage libre). Les Tableaux 15, 16, 17 présentent respectivement le milieu biophysique, les caractères généraux et la description des horizons du profil du Cambisol positionné au bas de pente.

Tableau 15 : Milieu biophysique du profil d'un Cambisol

Segment concave à pente faible non cultivé, sols peu épais sur matériaux carbonatés sableux en piedmont	
Dynamique morphologique	Piedmont
Forme morphologique	Bas de pente
Importance de la pierrosité	Vue en surface à large échelle
Érosion	Non
Superficie totale	Plus de 150 ha en continu
Pente	4%
Matériaux d'origine	Calcaire sableux
Occupation du sol	Espace pâturé
Formation végétale	Arbustes (Bayaronde) éparses et plus denses en pente
Activité biologique	Fourmilières et termitières épigées et arboricoles peu nombreuses
Profondeur utile du sol	20/30 cm
Présence de carbonates	Basique
Drainage externe	Fort
Risque d'inondation	Faible

Variabilité	Faible
Informations complémentaires	Activité d'élevage importante

Tableau 16 : Caractères généraux du profil d'un Cambisol

Ident du profil	BF1 (Boouyara)
Profil amont	Oui
Localisation	Eglise pentecôtiste
Date	23 juillet 2023
Altitude (m)	379 m
Localisation sur le segment	Au bas de pente
Position sur le versant	Piedmont
Estimation du drainage interne	Drainé
Estimation perméabilité	Forte en surface
Profondeur utile cm	25-30
Classification WRB	Cambisol
Occupation/Utilisation du sol	Terres non travaillées, arbustes (bayaronde, mombin)
Discontinuité	Discontinuité à 25-30 cm avec apparition du calcaire sableux
Organisation géologique	Profil monolithique (cela veut dire qu'il y a 1 seul matériel parental)
Pierrosité de surface	Importante (présence de pierres)

Tableau 17 : Description des horizons du profil du Cambisol

0-25/30 cm	Couleur : gris blanc (10YR 5/1) avec de nombreuses taches noires, donc riche en MOS ; Cailloux : caillouteux ; discontinuité entre les 2 horizons en termes d'abondance en cailloux et de la richesse en MOS ; Structure : grumeleuse; Pas d'eau libre dans la porosité donc pas de saturation complète des horizons ; porosité : très poreux ; Effervescence : très élevée ; Activité biologique : peu ; Limite peu nette ; Présence des racines des graminées : plus abondantes en surface.
20/25-50 cm	Couleur : gris blanc : 10YR5/1 ; Abondance des pierres arrondies ; Humidité : Sèche dans l'ensemble ; Texture : sableuse avec la présence d'énormes galets de plus grande taille ; Quelques traces de vie coincées à proximité des cailloux/Galets.
50-100 cm	Couleur : brun : 7.5YR8/1 ; Abondance des pierres arrondies/galets de plus grande dimension ; Humidité : Sèche dans l'ensemble ; Texture : sableuse ; Faune : Quelques traces de vie coincées à proximité des cailloux/pierres. Racines : absence totale.



Figure 29 : Leptosol localisé au piedmont soumis au Pâturage. a) face échantillonnée pour les caractéristiques globales, prise d'échantillons pour mesure de densité apparente b) environnement du profil.

2.5. Le profil de sol localisé au plateau irrigué soumis aux pratiques intensives (cultures maraîchères et de riz) : Cas des Vertisols

Ce profil est localisé sous une végétation peu dense et est soumis au labour profond et à l'irrigation par gravité sauf en période d'interculture (1 à 2 mois). Faune quasiment absente le long du profil en raison de l'usage intensif d'intrants chimiques. Le sol présente une très forte différenciation verticale. Horizon arable très mince, le développement de la macrostructure et la couleur changent brusquement avec la profondeur (> 25 cm). En surface (0-25-30 cm), le profil (très argileux) est composé d'agrégats polyédriques peu nets de taille grossière (8 à 10 cm) et de grosses mottes de terres qui se débitent en agrégats sub-anguleux à arrondis de plus petite taille (environ 1 cm). Ces derniers sont composés de microagrégats arrondis, de taille < 1 mm. La couleur en surface est noire en raison d'une part de la nature du (Vertisol) mais aussi de la présence des matières organiques (résidus de culture, bouse de vache) lors de l'interculture (Figure 30c). Les variations de structure et de couleur ont permis de distinguer deux horizons (voire 3 avec une analyse plus approfondie) : (A, AB, B) dont les limites sont nettes entre A et

AB et très peu nettes entre AB et B. Généralement, il n'existe pas (ou très très peu) d'activités biologique dans le système intensif. Quant aux racines, ont été observées que des racines des fines des graminées (mauvaises herbes, riz et celles des autres cultures). Ces racines s'orientent horizontalement. Suivant les résultats du test de Beerkan (étude sur la performance agroécologique en cours), la vitesse d'infiltration n'excède pas 40 ml par minute. Les Tableaux 18, 19, 20 présentent respectivement le milieu biophysique, les caractères généraux et la description des horizons du profil d'un Vertisol sous culture irriguée.

Tableau 18 : Milieu biophysique du profil d'un Vertisol en plateau irrigué

Périmètre irrigué, sols peu épais sur matériaux carbonatés argileux	
Dynamique morphologique	Plateau
Forme morphologique	Plateau irrigué
Importance de la pierrosité	Non vue en surface
Érosion	Submersion souvent (irrigation par gravité)
Superficie totale	Espace représentatif de plus de 100 ha immédiats
Pente	1%
Matériaux d'origine	Calcaire
Occupation du sol	Culture maraichère et du riz
Formation végétale	Grands arbres dispersés (manguier) ; riz, légumes
Activité biologique	Aucune trace de vie ressentie
Profondeur utile du sol	25/30 cm
Présence de carbonates	Basique
Drainage externe	Très faible
Risque d'inondation	Elevé
Variabilité	Forte
Informations complémentaires	Activité d'élevage importante en période d'interculture courte

Tableau 19 : Caractères généraux du profil de Rendzic Leptosol

Ident du profil	FS1 (Sanyago)
Profil amont	Oui
Localisation	Porte 6
Date	21 juillet 2023
Altitude (m)	366 m
Localisation sur le segment	Au plateau
Position sur le versant	100% positionné en plateau
Estimation du drainage interne	Non drainé (risque d'inondation élevé)
Estimation perméabilité	Faible
Profondeur utile cm	25-30
Classification WRB	Vertisol
Occupation/Utilisation du sol	En début d'interculture, comme précédent cultural : cultures maraichères, riz, gombo.
Discontinuité	Discontinuité à 25-30 cm avec apparition des particules grossières plus importantes
Organisation géologique	Profil monolithique (cela veut dire qu'il y a 1 seul matériel parental)
Pierrosité de surface	Très faible

Tableau 20 : Description des horizons du profil

0-25/30 cm	Couleur : Noir avec quelques taches rouges (10YR 5/3) ; Peu Caillouteux ; Effervescence : élevée ; Structure polyédrique ; Texture : argileuse dans l'ensemble ; Netteté : nette par rapport au 3 ^{ème} horizon ; Compaction : compact ; Activités biologiques : nulle ; Fragilité : très peu fragile ; Plasticité : plastique ; Adhésivité : oui ; Présence des racines : seules les racines fines.
25/30-100 cm	Couleur : Rouge, brun avec des taches (10YR 6/4) ; Abondance de tache : taches très nombreuses ; Limite nette avec l'Horizon 1 ; Régularité : Elle est ondulée ; Etat d'humidité : plus humide par rapport au premier ; Dimension fine ; Redistribution carbonatée et de fer ; Observation des taches grises d'hydromorphie ; Structure massive polyédrique anguleuse avec du sable très fin ; Compacité : très compact ; Effervescence : généralisée ; Noyau plus carbonaté ; Pas de MO, mais quelques racines anciennement décomposées ; Texture : argileuse au niveau de la matrice et pas de cailloux ; Porosité : peu poreux dans la matrice, il y a de sables fins calcaires et silicieux ; Eléments grossiers : peu abondants ; Effervescence : massive ; Localisation d'effervescence : généralisée ; La structure peu nette et massive ; Compaction très forte ; Activités biologiques : pas de trace ; Peu poreux ou porosité d'empilement ; Fragilité : non ; Plasticité : plastique ; Adhésivité : oui ; Présence des racines : non.



Figure 30 : Vertisol localisé au périmètre irrigué soumis aux pratiques intensives a) vue globale de la fosse pédologique ; b) face échantillonnée pour les caractéristiques globales, prise d'échantillons pour mesure de densité apparente ; c) et d) environnement du profil.

2.6. Le profil du sol localisé au plateau non irrigué soumis aux pratiques semi-intensives (cultures associées, plaine de Sanyago) : Cas des Vertisols

Positionné sur superficie de plus de 8 hectares, ce profil est localisé sous une végétation peu dense dominée par des manguiers et d'avocatsiers et de chêne (80 arbres). Il subit une jachère d'environ 6 mois par année avec labour peu profond (traction animale) et à l'irrigation est pratiquée en cas de disponibilité en eau, d'où quelques traces d'hydromorphie observées en profondeur. Mise à part des racines fines présentes en surface, très peu de Fourmis s'observent le long du profil, pas de vers de terre. Selon le propriétaire, cette parcelle était surtout soumise à l'usage intensif mais en raison de la rareté de l'eau d'irrigation qui se fait ressentir depuis près de deux ans, il change de pratique. Donc, l'usage antérieur intensif des intrants chimiques en

est la cause d'absence de vie dans le profil de sol. Le profil présente une très forte différenciation verticale. Horizon arable très mince, le développement de la macrostructure et la couleur changent brusquement avec la profondeur (> 30-40 cm) (Figure 31a). En surface (0-30-40 cm), le profil (très argileux) est constitué de mottes de plus de 15 cm. Ces grosses mottes de terres se débitent en agrégats sub-anguleux à arrondis de plus petite taille (environ 3-5 cm). La couleur en surface est noire en raison du renouvellement des matières organiques (résidus de culture, bouse de vache) lors des jachères. Les variations de structure et de couleur ont permis de distinguer trois horizons dont le dernier est dépourvu de structure (sable fin). Les limites sont nettes entre H1 et H2 et très peu nettes entre H2 et H3 (différence liée à la granulométrie). Quant aux racines, ont été observées que des racines fines des graminées (mauvaises herbes et celles des autres cultures) dans les 10 premiers centimètres du sol. Ces racines s'orientent horizontalement. Les Tableaux 21, 22, 23 présentent respectivement le milieu biophysique, les caractères généraux et la description des horizons du profil d'un Vertisol sous culture non-irriguée.

Tableau 21 : Milieu biophysique du profil d'un Vertisol en plateau non irrigué

Plateau non-irrigué, sols épais sur matériaux carbonatés argileux	
Dynamique morphologique	Plateau
Forme morphologique	Plateau
Importance de la pierrosité	Non vue en surface
Érosion	Faible risque d'érosion
Superficie totale	Espace représentatif de plus de 20 ha immédiats
Pente	3%
Matériaux d'origine	Calcaire
Occupation du sol	Culture en association (Pois-congo, maïs, arachides, gombo)
Formation végétale	Grands arbres dispersés (manguier), plus de 80 arbres inventoriés constitués principalement de manguiers et d'avocateurs et de chêne
Activité biologique	Faible
Profondeur utile du sol	25/30 cm
Présence de carbonates	Basique
Drainage externe	Moyen
Risque d'inondation	Moyen
Variabilité	Forte
Informations complémentaires	Activité d'élevage importante en période de jachère de 6 mois

Tableau 22 : Caractères généraux du profil de Rendzic Leptosol

Ident du profil	FS2 (Santiago)
Profil amont	Oui
Localisation	Porte 14
Date	21 juillet 2023
Altitude (m)	354 m
Localisation sur le segment	Au plateau non irrigué de santiago
Position sur le versant	100% positionné en plateau
Estimation du drainage interne	Faible (risque d'inondation moyen)
Estimation perméabilité	Moyenne
Profondeur utile cm	35-40 cm
Classification WRB	Vertisol
Occupation/Utilisation du sol	Cultures annuelles
Discontinuité	Discontinuité à 35-40 cm avec apparition des particules grossières plus importantes
Organisation géologique	Profil monolithique (cela veut dire qu'il y a 1 seul matériel parental)
Pierrosité de surface	Très faible

Tableau 23: Description des horizons du profil

0-35/40 cm	Couleur : Noir avec quelques taches rouges : 10YR3/1 ; Pierrosité : Peu Caillouteux ; Effervescence : élevée ; Structure : polyédrique ; Texture : argileuse dans l'ensemble ; Netteté : nette par rapport 3 ^{ème} horizon ; Compaction : compact ; Activités biologiques : nulles ; Fragilité : très peu fragile ; Plasticité : plastique, Adhésivité : oui ; Présence des racines : seules les racines fines.
30/40–70 cm	Couleur : 10YR4/3 ; Abondance de tache, taches très nombreuses ; Limite nette avec l'Horizon 1 ; Régularité : Elle est ondulée ; Etat d'humidité : plus humide par rapport au premier ; Dimension fine ; Redistribution carbonatée et de fer ; Observation des taches grises ; Structure massive polyédrique anguleuse avec du sable très fin ; Compacité : très compact ; Effervescence : généralisée ; Noyau plus carbonaté ; Pas de MOS vibles mais quelques racines anciennement décomposées ; Texture : argileuse au niveau de la matrice et pas de cailloux ; Porosité : peu poreux dans la matrice, il y a de sables fins calcaires et silicieux ; Eléments grossiers : peu abondants ; Localisation d'effervescence : généralisée ; La structure peu nette et massive ; Compaction très forte ; Activités biologiques : pas de trace ; Peu poreux ou porosité d'empilement ; Fragilité : non ; Plasticité : plastique ; Adhésivité : oui ; Présence des racines : non.
70-100	Couleur : 7.5YR 5/6 ; Sans structure (sable fin dans l'ensemble) ; Présence de racine : aucune ; Fragilité : oui ; Plasticité : non plastique ; Compacité : peu ; Effervescence : forte.



Figure 31 : Vertisol localisé au plateau non irrigué soumis aux pratiques non intensives (Sanyago) a) vue globale de la fosse pédologique ; b) face échantillonnée pour les caractéristiques globales, prise d'échantillons pour mesure de densité apparente.

2.7. Le profil de sol localisé au plateau non irrigué soumis à l'usage semi-intensif avec la valorisation des rotations de légumineuse (Plaine de Bouyara) : Cas d'un Calcic-Cambisol

Ce profil subit également une jachère d'environ 6 mois par année avec labour peu profond (traction animale). Pas d'irrigation ! Constat fait par rapport au profil précédent, les racines, s'orientant verticalement, sont plus abondantes et agiraient sur la structure du sol (présence d'énorme fente verticales facilitant l'infiltration de l'eau), la trace de vie se fait remarquée le long du profil ainsi que très de vers de terre. Le profil présente une très faible différenciation verticale. Le développement de la macrostructure et la couleur changent progressivement avec la profondeur (> 40 cm) (Figure 32a). En surface (0-40 cm), le profil (très argileux) est constitué de d'agrégats de 3 à 6 cm. Ces derniers se débitent en agrégats sub-anguleux à arrondis de plus petite taille (environ 3-5 cm) vu l'ampleur de la teneur en argile. La couleur en surface est noire en raison du renouvellement des matières organiques (résidus de culture, bouse de vache) lors des jachères. Les variations de structure et de couleur ont permis de distinguer trois horizons dont le dernier est très compact. Les limites sont peu nettes entre H1 et H2 et nettes entre H2 et

H3 (différence liée à la couleur). Quant aux racines, elles se font remarquer jusqu'à H2, d'où l'importance des légumineuses dans les agrosystèmes. Ces racines s'orientent verticalement. Suivant les résultats du test de Beerkan (étude sur la performance agroécologique en cours), la vitesse d'infiltration est de 216,84 ml par minute. Les Tableaux 24, 25, 26 présentent respectivement le milieu biophysique, les caractères généraux et la description des horizons du profil d'un Calcic Cambisol.

Tableau 24 : Milieu biophysique du profil d'un Vertisol en plateau non irrigué

Plateau non-irrigué, sols épais sur matériaux carbonatés	
Dynamique morphologique	Plateau
Forme morphologique	Plateau
Importance de la pierrosité	Faible : non vue en surface
Érosion	Faible risque d'érosion
Superficie totale	Espace représentatif de plus de 80 ha immédiats
Pente	2%
Matériaux d'origine	Calcaire
Occupation du sol	Culture en association (Pois-congo, maïs, arachides, gombo)
Formation végétale	Grands arbres dispersés (manguier), arbres éparses inventoriés (manguiers et avocatier)
Activité biologique	Moyenne
Profondeur utile du sol	40-50 cm
Présence de carbonates	Basique
Drainage externe	Fort
Risque d'inondation	Faible
Variabilité	Faible
Informations complémentaires	Activité d'élevage importante en période de jachère de 6 mois, manque de valorisation des arbres fruitiers dans cette zone

Tableau 25 : Caractères généraux du profil du Calcic Cambisol

Ident du profil	BF4 (Sanyago)
Profil amont	Oui
Localisation	Bouyaha route de Lacabouille
Date	23 juillet 2023
Altitude (m)	377 m
Localisation sur le segment	Au plateau non irrigué de Bouyaha
Position sur le versant	100% positionné en plateau
Estimation du drainage interne	Faible (risque d'inondation moyen)
Estimation perméabilité	Acceptable
Profondeur utile cm	35-40 cm
Classification WRB	Vertisol
Occupation/Utilisation	Cultures annuelles

du sol	
Discontinuité	Discontinuité à 35-40 cm avec apparition des particules grossières plus importantes
Organisation géologique	Profil monolithique (cela veut dire qu'il y a 1 seul matériel parental)
Pierrosité de surface	Très faible

Tableau 26 : Description des horizons du profil

0-40 cm	Couleur : Noir avec quelques taches rouges : 10YR 4/3 ; Peu Caillouteux ; Effervescence : moyenne ; Structure polyédrique ; Texture : argileuse dans l'ensemble ; Netteté : peu nette par rapport à H2 et nette par rapport au 3 ^{ème} horizon ; Compaction : peu compact ; Activités biologiques : moyenne ; Fragilité : très peu fragile ; Plasticité : plastique ; Adhésivité : oui ; Présence des racines : moyennes et fines s'orientant verticalement provoquant des fentes de plus de 3 cm le long du profil.
40-80 cm	Couleur : 10YR 6/4 ; Abondance de taches, taches très nombreuses avec dominance noire ; Limite peu nette avec l'Horizon 1 ; Régularité : Elle est ondulée ; Etat d'humidité : plus humide par rapport au premier ; Dimension fine ; Redistribution carbonatée et de fer ; Structure massive polyédrique anguleuse avec du sable très fin ; Compacité : très compact, plus argileux ; Effervescence : généralisée ; Noyau plus carbonaté ; Présence de MO, ; Texture : argileuse au niveau de la matrice et pas de cailloux ; Porosité : non poreux dans la matrice, il y a de sables fins calcaires et silicieux ; Eléments grossiers : peu abondants ; Localisation d'effervescence : généralisée ; La structure peu nette et massive ; Compaction très forte ; Activités biologiques : très peu ; Fragilité : non ; Plasticité : plastique ; Adhésivité : oui ; Présence des racines : quelques petites racines fine.
80-120 cm	Couleur : 10YR 5/3 ; Structure très compact ; Présence de racine : aucune ; Fragilité : non ; Plasticité : oui ; Compacité : oui ; Effervescence : forte

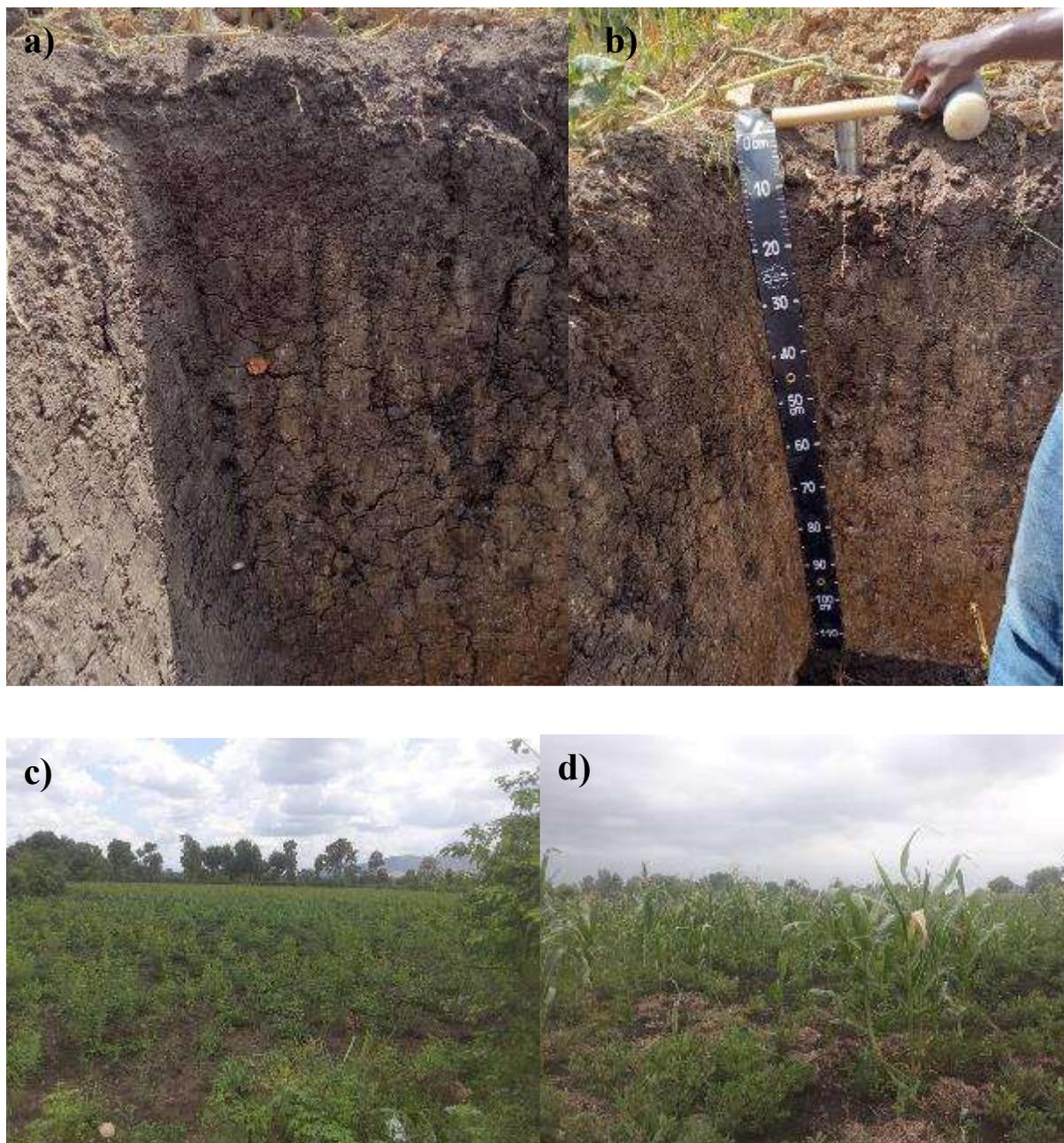


Figure 32 : Vertisol localisé au plateau non irrigué soumis aux pratiques semi-intensives (Bouyara) : a) vue globale de la fosse pédologique pour la description globale du profil ; b) prise d'échantillons pour mesure de densité apparente ; c) et d) environnement du profil.

2.8. Le profil du sol localisé en vallée sous agroforesterie (très dense) à base de cacaoyer (AFC) : Cas d'un RELEC

Ce profil est localisé sous une végétation très dense soumise à l'agroforesterie à base de cacao. La faune est très abondante (vers de terre en particulier) le long du profil (pas d'usage d'intrants

chimiques). Ce profil présente très peu de différenciation verticale. Horizon arable très profond (> 40 cm).

Généralement, la macrofaune est plus bien représentée dans ce système agroforestier par rapport au premier susmentionné, notamment par un grand nombre de fourmis, de termites et surtout des vers de terre et d'autres animaux comme les myriapodes, les hexapodes et des araignées (décapodes). Dans l'ensemble la texture semble limoneuse avec la présence d'abondantes litières végétales en décomposition. Fortement poreux, la couleur de ce profil pédologique, unique dans la zone, est uniforme depuis l'horizon de surface jusqu'à 100 cm. La différence d'horizon est observée en tenant compte de l'abondance des racines et le test au couteau (porosité). La densité apparente est tellement faible à l'horizon de surface ($0,8 \text{ g cm}^{-3}$), on dirait que c'est un Andosol (Figure 33).

En surface (0-25-30 cm), le profil (très limoneux et friable) est composé d'agrégats nets de taille moyenne (1 cm). Quant aux racines, ont été observées des racines de dimension variable (très grosse, grosses, moyennes, fines et très fines). Ces racines s'orientent verticalement. Suivant les résultats du test de Beerkan (étude sur la performance agroécologique en cours), la vitesse d'infiltration pour ce profil est de 1534 ml par minute. Les Tableaux 27, 28, 29 présentent respectivement le milieu biophysique, les caractères généraux et la description des horizons du profil d'un Vertisol sous culture irriguée.

Tableau 27 : Milieu biophysique du profil d'un Calcic Cambisol

Vallée de Mathurin, sols épais sur matériaux carbonatés en Vallée sous usage agroforestier à base de cacao.	
Dynamique morphologique	Vallée
Forme morphologique	Vallée
Importance de la pierrosité	Faible, Vue en surface à petite échelle
Érosion	0 érosion
Superficie totale	Surface homogène de plus de 60 ha logée long de la rivière Bouyaha.
Pente	3%
Matériaux d'origine	Calcaire
Occupation du sol	Culture en association (Pois-congo, maïs, arachides, gombo)
Formation végétale	Grands arbres denses (manguier) mélangés avec des cacaoyers.
Activité biologique	Moyenne
Profondeur utile du sol	40-50 cm
Présence de carbonates	Basique
Drainage externe	Fort
Risque d'inondation	Faible
Variabilité	Faible
Informations complémentaires	Activité d'élevage importante en période de jachère de 6 mois, manque de valorisation des arbres fruitiers dans cette zone

Tableau 28 : Caractères généraux du profil du Calcic Cambisol

Ident du profil	MF1
Profil amont	Oui
Localisation	Mathurin (
Date	23 juillet 2023
Altitude (m)	377 m
Localisation sur le segment	Au plateau non irrigué de Bouyaha
Position sur le versant	100% positionné en plateau
Estimation du drainage interne	Faible (risque d'inondation moyen)
Estimation perméabilité	Acceptable
Profondeur utile cm	35-40 cm
Classification WRB	Vertisol
Occupation/Utilisation du sol	Cultures annuelles
Discontinuité	Discontinuité à 35-40 cm avec apparition des particules grossières plus importantes
Organisation géologique	Profil monolithique (cela veut dire qu'il y a 1 seul matériel parental)
Pierrosité de surface	Très faible

Tableau 29 : Description des horizons du profil

<p>0-45 cm</p>	<p>Couleur : 10YR 5/4 : Il est divisé en 2 sous horizons : Horizon de surface travaillé (0-30) et horizon de surface non travaillé (30-45) ; Continuité entre ces 2 sous horizons en termes de couleur mais non en termes de structure ; 0-30 cm : abondance racinaire : élevée (seule la Vallée détient cette potentialité) suivant une bonne orientation verticale (Infiltration facilitée) ; Activités biologiques : élevée (beaucoup de vers de terre) ; Compacité : non et poreux ; Effervescence : élevée ; Structure : En dessus : plus massive avec une Structure grumeleuse, agrégats arrondis et très grumeleuse en surface. 30-45 cm : plus massive avec une Structure peu grumeleuse, agrégats anguleux et très abondants ; Pas d'eau libre dans la porosité donc pas de saturation complète des horizons ; pas de discontinuité porale entre les 2 sous-horizons de surface ; Pas de discontinuité texturale non plus.</p>
<p>45-80 cm</p>	<p>Couleur : 10YR 5/4 ; Pierrosité : caillouteux ; Effervescence : localisée mais moyenne ; Structure : grumeleuse ; Texture : limoneuse dans l'ensemble ; Netteté : nette par rapport au 3^{ème} horizon ; Compaction : faiblement compact ; Activités biologiques : faible ; Fragilité : peu fragile ; Plasticité : peu plastique ; Adhésivité : non ; Présence des racines : Dimension variée (hétérogéité de taille), mais réduite par rapport au premier.</p>
<p>80-120 cm</p>	<p>Couleur : brune avec quelques taches noires : (10YR 2/2) ; Peu Caillouteux même en profondeur ; Effervescence : élevée ; Structure massive ; Texture : sableuse dans l'ensemble ; Netteté : très nette ; Compaction : très peu compact ; Activités biologiques : faible ; Fragilité : Fragile ; Plasticité : non ; Adhésivité : non ; Présence des racines : peu , Répartition moins homogène, moins abondantes, très fines (< 1mm), verticales, inter mais surtout intra agrégats, présentes jusqu'en profondeur de 120 cm.</p>



Figure 33 : Profil localisé en vallée soumis aux pratiques agroforestières de type AFC: a) vue globale de la fosse pédologique pour la description globale du profil et mesure de densité apparente ; b) Vue de l'horizon humifère en dessous duquel emmagasinent les macroagrégats stables en surface de 1 à 2 cm ; c) environnement du profil.

3. Conclusion

Globalement, les huit profils pédologiques présentent un horizon A peu profond (0-20/25 cm à mi-pente à l'exception de la vallée où l'agroforesterie domine avec une profondeur pouvant atteindre 50 cm. Toutefois l'horizon A des sols de plateau est varié, tantôt profonds, tantôt minces. Cela peut s'expliquer par différents facteurs : le travail du sol, le mode d'occupation du sol, la richesse en matière organique et l'abondance des racines (Dignac et al., 2017). Dans

cet horizon, la couleur du sol est plus foncée (noire ou brun) par rapport à l'horizon sous-jacent. Cela peut être expliqué par la présence de la matière organique liée à la forte densité racinaire. En général, les profils avec un horizon de surface profond sont les RELEC et Calcic Cambisols positionnés en vallée. Outre la couverture végétale, ces terres positionnées en vallée bénéficient d'un transfert de fertilité lié à la mobilité de la MOS où les agriculteurs déplacent les ressources organiques des versants qui sont disponibles comme le bois, les résidus de culture, les fourrages dans le paysage en pente pour fertiliser involontairement les jardins de case dans les plateau et vallée (Dorvil et al., 2003), d'où l'une des causes des meilleurs paysages observés dans la majorité des unités agroécologiques des plaines/plateaux d'Haïti (*couramment on dit ceux d'en haut enrichissent ceux d'en bas*). Dans la majorité des cas, l'horizon sous-jacent est un horizon de transition AB (20/25-50/60 cm), avec une limite inférieure nette en plateau et très peu nette en vallée et en versant. Dans cet horizon les racines sont encore présentes mais avec une très faible densité sauf en vallée (profil 2 et 8). L'horizon B (50/60-100/110 cm) se distingue des horizons supérieurs par la présence de quelques volumes denses répartis dans une matrice micro-agrégée. La couleur est souvent très distincte des horizons supérieurs. Dans les profils agroforestiers on a remarqué de nombreuses galeries de vers de terre, chambres de termitières et fourmilières. En plus de l'humidité du sol, cette abondance de la macrofaune (chapitre 5) observée en SA positionné en vallée pourrait être également liée à la teneur en carbonate de Calcium (Kanianska et al., 2016). Toutefois aucune trace de vie n'est observée à l'œil nu dans les profils du système irrigués, d'où l'impact direct des pesticides chimiques et des fortes doses d'engrais dans cet agrosystème.

En conclusion, aucun profil de la commune de Saint-Raphaël ne présente un horizon humifère typique à l'exception du profil 8 localisé en vallée soumis aux pratiques agroforestières à base de cacaoyer (AFC). Dans cet horizon humifère, l'horizon de litière (OL) et l'horizon de fragmentation (OF) sont très distinct à l'œil nu. Par contre, l'horizon humifié (OH) n'est pas reconnaissable, il est donc confondu avec l'horizon organominérale (A) (0-30 cm).

**CHAPITRE IV⁴ : LEGUMINEUSES, AGROFORESTERIE, LABOUR ET
PATURAGE : LES DETERMINANTS DE LA DIVERSITE DES SYSTEMES DE
CULTURE A SAINT-RAPHAËL, HAÏTI**

⁴ Publié : **Dorvil W.**, 2023. 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, Haïti, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 19 p. [DOI: https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i4.281](https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i4.281)].

Jachère, légumineuses, agroforesterie et labour : les déterminants de la diversité des systèmes de culture à Saint-Raphaël, Haïti

Résumé

En vue d'évaluer l'impact des pratiques agricoles sur les sols, les approches d'expérimentation de longue durée et de simulation à partir de modèles numériques sont de plus en plus fréquentes. Cependant, dans le contexte des pays du Sud, elles sont souvent difficiles à mettre en œuvre, faute de moyens. Cette étude avait pour objectif de décrire la diversité des systèmes (SC) de culture rencontrés dans une petite région d'altitude d'Haïti, afin d'utiliser ces connaissances, pour raisonner dans une deuxième étape, un dispositif d'évaluation « on-farm » de leurs effets sur les sols. Le concept de système de culture met en avant les interactions fortes existant entre les décisions techniques que prennent les agriculteurs sur leurs parcelles, aussi bien en termes de successions et associations culturales, de gestion de leur disponibilité en nutriments et en eau, et de contrôle des bioagresseurs des cultures. Notre étude s'était appuyée sur 78 parcelles d'agriculteurs sélectionnées avec l'aide de personnes ressources de la région, pour représenter la diversité des unités pédo-bioclimatiques. Chaque parcelle a fait l'objet d'une enquête auprès de son exploitant en vue de décrire ses choix techniques de ces 10 dernières années. On a mis en évidence la coexistence de quatre systèmes de culture (SC) : un système intensif (SI), un système semi-intensif (SSI), un système agroforestier (SA) et un système de pâturage permanent (SSU). Ils étaient répartis suivant le pédoclimat avec le SI dominant dans le périmètre irrigué, le SSI dans le plateau non irrigué, le SA dans les vallées et le SSU dans les versants. Le labour n'était absent qu'en SSU. Les indicateurs de ces systèmes étaient facilement accessibles et peuvent être mobilisés en vue de raisonner un dispositif d'évaluation des performances agro-environnementales des pratiques des agriculteurs et concevoir des améliorations de gestion.

Mots clés: Typologie, Pratiques, Changements d'usage des terres, Sols, Rotations des légumineuses

Legumes, Agroforestry, Plowing and Pasture: determinants of the cropping systems diversity in Saint-Raphael, Haïti

Abstract

In order to assess the impact of agricultural practices on soils, long-term experimental and simulation approaches based on numerical models are becoming increasingly common. However, in the context of Southern countries, they are often difficult to implement due to lack of financial resources. The objective of this study was to describe the diversity of cropping systems (SC) encountered in a small highland region of Haïti, in order to use this knowledge to reason, in a second step, an "on-farm" evaluation system of their effects on soils. The concept of cropping systems highlights the strong interactions between the technical decisions that farmers make on their plots, both in terms of crop succession and associations, management of nutrient and water availability, and control of crop pests. Our study was based on 78 farmers' plots selected with the help of resource persons in the region, to represent the diversity of soil-bioclimate units. Each plot was surveyed to describe the technical choices made by the farmer over the last 10 years. Four cropping systems (SC) were found to coexist: an intensive system (SI), a semi-intensive system (SSI), an agroforestry system (SA) and a permanent pasture system (SSU). They were distributed according to the pedoclimate, with the SI system dominating in the irrigated perimeter, the SSI system in the non-irrigated plateau, the SA system in the valleys and the SSU system on the slopes. Plowing was absent only in SSU. The indicators of these systems were easily accessible and can be used to reason out an evaluation system of the agro-environmental performance of farmers' practices and to design management improvements.

Keywords: Typology, Practices, Land use change, Soils, Legume rotations

1. Introduction

En Haïti, les changements d'usages des terres ont affecté de grandes superficies. Au cours de la période 1985-2018 la surface de la couverture forestière naturelle a diminué de 46 à 50% selon les régions. Les statistiques indiquent que la couverture forestière occupe moins de 5% de la surface agricole utile (Salomon et al., 2021). En effet, de 2001 à 2017, Haïti a perdu près de 58900 ha de couvert forestier (MDE, 2019). Cette dernière décade a été marquée par de longues périodes de sécheresse entraînant une baisse du niveau des nappes phréatiques, la compaction de la surface du sol et le déclin des espèces cultivées (PAM, 2023). Le nombre de saisons culturales est passé de trois à deux dans les agrosystèmes de plaine ou de plateau et, à une seule saison sur les versants. Les terres positionnées dans les périmètres irrigués sont surexploitées. Les surfaces en jachères ont régressé et leur surpâturage est de plus en plus fréquent.

Tous ces changements sont liés en partie à l'accroissement de la pression démographique. En 2008, 103624 exploitations agricoles étaient inventoriées dans le département du Nord (MARNDR, 2012). Aujourd'hui, Saint-Raphaël, l'une des 19 communes du Nord en compte à elle seule près de 53755 habitants pour 183 km², soit 294 habitants au km² (IHSI, 2015). Globalement, depuis 1950, Haïti subit une dégradation accélérée de son espace rural et de ses ressources naturelles (Smolikowski, 1993).

Dans le cadre des systèmes de culture actuels la FAO et l'ITPS (2015) rapportent pour les régions tropicales une diminution de la capacité des sols à conserver leur biodiversité et à maintenir leur structure. De plus, de nombreuses expérimentations réalisées au niveau de la ceinture tropicale ont montré que différentes techniques comme le labour (McGarry et al., 1999 ; Clermont-Dauphin et al., 2004 ; Kushwaha et Singh, 2005 et Masson et al., 2022), l'agroforesterie (Sileshi, 2016), l'apport de matière organique (Toukara et al., 2020), la fréquence des légumineuses dans les rotations avec les céréales (Clermont-Dauphin et al., 2003), la couverture du sol par les résidus de culture (Adams et al., 2016), la mise en jachère (Brown et al., 1999 ; Samaké et al., 2006) peuvent avoir un rôle essentiel sur le maintien des ressources du sol. Mais elles suggèrent aussi que ces effets peuvent être très dépendants des caractéristiques pédo-bioclimatiques ainsi que des autres techniques associées. Face à l'insuffisance des connaissances sur les interactions en jeu dans les systèmes de culture, et à la complexité de ces interactions dans les agricultures à faible niveau d'intrants des pays du Sud, les perceptions des agriculteurs peuvent être d'une grande utilité pour aider à cerner une typologie qui tienne compte de ces interactions et leurs effets sur les sols à l'échelle locale.

Ainsi, nous testons l'hypothèse qu'il existe à Saint-Raphaël une diversité de systèmes de culture (SC) qui se caractérisent, non seulement par les espèces présentes, mais aussi par la diversité des modes de conduite de ces espèces depuis une dizaine d'années, et par leur position dans le paysage. L'objectif de cette étude était de réaliser une typologie des SC, en tirer des enseignements sur les pratiques actuelles et mettre cela en perspective de travaux futurs de meilleure gestion des sols et des terres.

2. Méthodes

2.1. Zone d'étude

Saint-Raphaël se divise en quatre sections communales : Bois Neuf et Mathurin situées dans les reliefs du Nord et, Bouyaha et Sanyago situées majoritairement sur un plateau à environ 400 m d'altitude (Figure 34). Ces deux dernières comprennent 2350 ha de terres irriguées. Le Tableau 30 révèle une surface agricole très faible par exploitation agricole. Les surfaces de déprises agricoles et les savanes représentent respectivement 19% et 14%.

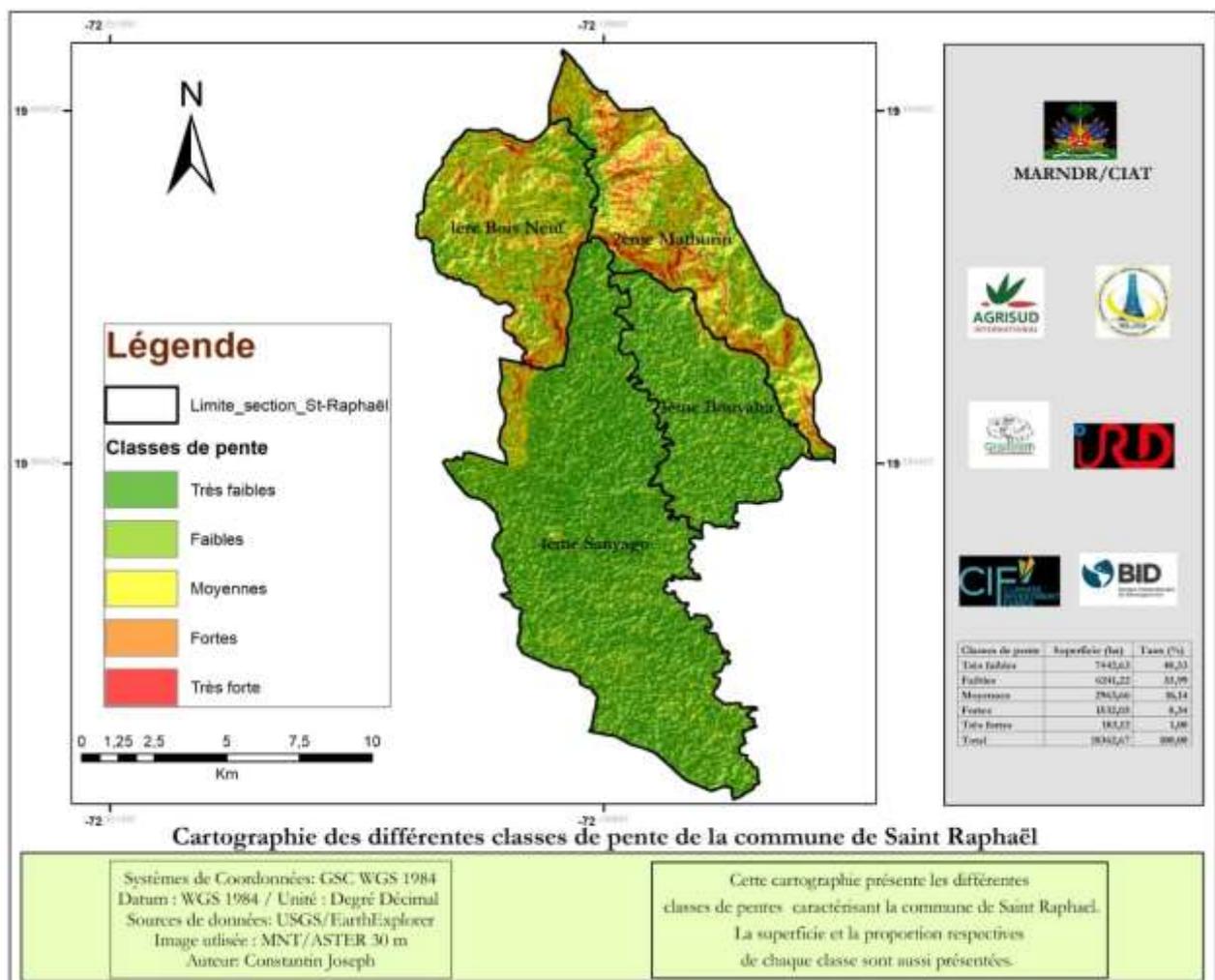


Figure 34 : Distribution des quatre sections administratives de Saint Raphaël et cartographie des différentes classes de pente : très faibles < 6%, faibles 6-12%, moyennes 13-20%, fortes 20-50%, très fortes > 50% (CHCL et al., 2020).

Tableau 30 : Descriptif agricole des sections communales et principales espèces cultivées. Les deux dernières colonnes entre parenthèses présentent le % de terres emblavées par culture.

Section Commu-nale	superficie totale (ha)	Sols (WRB, 2014)	Densité population Hab.km ⁻² (IHSI, 2015)	Nombre d'exploitations agricoles (EA)	% Surface arborée / végétation naturelle	% Surface irriguée	Taille moyenne des EA (ha)	Surface moyenne cultivée par EA (ha)	Terre cultivée (% superficie totale)	Cultures (% en terres cultivées)	
										annuelles (%)	Agro forêts (%)
Bois Neuf	3174,66	Regosols, Leptosols,	163	2750	9	0	1,52	0,8	37	Pois Congo (30) Maïs (30) Haricot (30) Gombo (5)	Igname (30) Banane (30) Haricot-maïs (30) Pois-congo (5)
Mathurin	3771,71	Alisols, Regosols, Leptosols	98	1200	12,5	0	1,26	0,7	16	Pois Congo (30) Haricot (25) Maïs (25) Gombo (10) Épinard (7)	Igname: (25) Banane: (25) Haricot-maïs (25) Pois-congo (15) Cacaoyer (5)
Bouyaha	3024,76	Leptosols, Rendosols, Vertisols	243	3700	12	3	1,32	0,75	58	Maraichères (40) Canne-à-sucre (20) * Riz (15) * Pois Congo (10) Maïs (10)	Igname (25) Banane (20) Maïs (15) Canne-à-sucre (15) * Haricot (10) Pois-congo (5) Gombo (3) Épinard (2)
Sanyago	8414,17	Vertisols, Gleysols,	237	10350	5	28	1,35	0,45	59	Maraichères(75) * Riz (15) * Pois-congo (5)	Igname (20) Banane (20) Maïs (20) Haricot (10) Pois-congo (5) Giraumont (5) Épinard+gombo (5) Haricot (5) Cacaoyer (3) Pois boussoucou (2)

* : cultures pratiquées en pur ; EA : exploitation agricole / *: monocultures ; EA: Farms

2.1. Choix des parcelles d'enquêtes

Le bureau agricole communal nous a introduits auprès des personnes ressources (Responsables d'associations et de Sections communales) qui, à leur tour, nous ont indiqués des agriculteurs ayant une bonne connaissance de la région et de son histoire. Ils étaient en général parmi les plus âgés de la région. La réalisation de quatre visites de terrain avec ces agriculteurs et de quatre ateliers d'échanges ainsi que l'examen des matériels collectés par ailleurs (cartographie des caractéristiques environnementales, photographies aériennes) nous ont permis de sélectionner 78 parcelles représentant la diversité des combinaisons entre les caractéristiques morphopédologiques, les successions culturales et les conduites de cultures (Figure 22).

2.2. Description des systèmes de culture (SC)

Notre description des SC pratiqués sur chacune des parcelles sélectionnées est tirée de Sebillotte (1978) qui définit un SC par les successions culturales et les itinéraires techniques associées aux cultures pratiquées sur une parcelle ou un groupe de parcelles conduit de manière homogène. Un formulaire d'enquête axé sur l'ensemble des variables servant à renseigner les systèmes de culture a été administré à chacun des agriculteurs des 78 parcelles. Les variables retenues pour décrire les SC sont rapportées dans le Tableau 2 et sont au nombre de 10. L'irrigation n'a pas été sélectionnée directement pour éviter des effets de redondance.

2.3. Connaissances et perceptions de la gestion des sols par les agriculteurs

Dans nos enquêtes, un intérêt particulier a été également porté sur l'importance relative des sols et des pratiques culturales. La méthode de distribution des petits cailloux a été appliquée, méthode d'évaluation de l'importance relative suggérée par Sheil et al. (2004) à partir des entretiens dirigés. Nous avons cherché à déterminer la place que joue le sol dans la logique d'action des agriculteurs (questionnaire en annexe).

2.4. Analyses statistiques pour cette étude

10 variables de caractérisation des SC ont été sélectionnées et transformées en variables catégorielles. Une analyse des correspondances multiples (ACM) a été réalisée afin de mettre à jour 1) les variables de caractérisation des systèmes de culture discriminant le mieux les parcelles, 2) les relations entre ces variables et 3) la position des individus par rapport à ces variables. Plusieurs groupes de parcelles caractérisés par l'association de plusieurs pratiques ont été ainsi caractérisés définissant donc une typologie des systèmes de culture. Le logiciel STATISTICA 7 a été utilisé (Hilbe, 2007).

3. Résultats

3.1. Typologie statistique et analyses des systèmes de culture (SC)

Le Tableau 31 présente la distribution des fréquences de 10 variables retenues pour caractériser les SC. Les catégories correspondant à chacune sont affectées d'un sigle qui sera repris dans l'analyse des correspondances. La Figure 35 présente les variables de caractérisation des SC au plan factoriel F1-F2 de l'ACM. Les deux axes expliquent 44,46% de la variance totale de l'échantillon. La Jachère, la pratique des légumineuses, la rotation culturale, l'apport en matière organique (MO) au sol et la diversité des espèces contribuent à l'axe 1 tandis-que l'axe 2 se traduit par les variables pesticides, fertilisation, le labour et l'association culturale. On observe en tout premier lieu un axe diagonal qui sépare le système de pâturage permanent (SSU) des trois autres systèmes échelonnés de bas en haut selon un axe d'intensification se traduisant par baisse de diversification croissant. Il est possible de distinguer quatre profils types de SC correspondant à 4 groupes.

- Le groupe (G1) se discrimine par un nombre élevé d'espèces pérennes sur la parcelle, la diversité des espèces, du nombre de légumineuses et d'apport de matière organique le plus important. Nous l'appelons « système agroforestier (SA) ». Ce groupe est généralement proche de la maison de l'exploitation familiale et est de type A.
- Un groupe (G2) situé sur l'axe 1 dans le cadran inférieur, caractérisé par un niveau d'intrants et de labour à la baisse par rapport au groupe G3. C'est un groupe intermédiaire entre G1 et G4. Nous l'appelons « système semi-intensif (SSI) ». Ce groupe est généralement plus ou moins proche des exploitations familiales et est de type B.
- Un groupe (G3) situé à l'axe 2 dans le cadran supérieur à droite du plan 1, 2. Ce groupe se discrimine par le labourage et l'usage intensif des engrais et des pesticides. Nous l'appelons « système intensif (SI) ». Il est caractérisé par le travail intensif du sol, l'irrigation par gravité, les brûlis des résidus de récolte se traduisant par une faible restitution organique, la forte utilisation d'intrants chimiques et une interculture courte (30-45 jours) avec le retour occasionnel des légumineuses. Ce groupe n'a aucun lien de proximité avec la maison de l'exploitation familiale. Il est situé au périmètre irrigué et de type C.
- Un groupe (G4) situé à l'opposé, dans le cadran supérieur gauche. Ce groupe se discrimine par le pâturage car ce sont en général des parcelles non cultivées de longue date. Couramment positionné aux versants, ce groupe est caractérisé par un apport de

matière organique plus important que le G3 via le pâturage d'animaux. Certaines parcelles sont boisées et d'autres sont totalement dénudées. Ce type est intitulé système de pâturage permanent (SSU) où on est dans un Jardin "loin-kay" de type D.

Les variables Topographie (Figure 36a), Section communale (Figure 36b), Classe de sol (Figure 36c) et Irrigation (Figure 36d) introduites en variables supplémentaires discriminent les types identifiés. Les parcelles de groupe 4 sont positionnées aux versants de Bois-Neuf et de Mathurin. Celles du groupe 2 (SSI) et 3 (SI) sont positionnées à Sanyago et à Bouyaha. Le groupe 4 (SA) domine la vallée. Il en est de même pour la variable supplémentaire « section communale » où les groupes 2 (SSI) et 3 (SI) sont positionnés à Bouyaha et à sanyago, le groupe 4 (SSU) aux versants de Bois Neuf et de Mathurin et le groupe 1 en vallées. Les Vertisols/Gleysols sont positionnés au plateau irrigué (G2 et G3), les Leptosols et les Haplic-Cambisols/Régosols en montagne (G4) et les RELEC aux groupes 1 et 2 (SA, SSI). Les parcelles irriguées sont positionnées aux G2 et G3 et celles non irriguées aux G1 et G4.

Tableau 31 : Répartition des parcelles en fonction des critères choisis (10) pour classer les systèmes de culture.

Variables d'étude des Systèmes de culture	Notes	ID de classe	Parcelles	% parcelle	Unité
Fréquence des labours sur 10 ans					
[0]	1	Lab1	12	15%	Nombre moyen / 10 ans
[1 à 10]	2	Lab2	25	32%	
[11 à 20]	3	Lab3	25	32%	
[21 à 30]	4	Lab4	16	21%	
Fréquence de légumineuses sur 10 ans					
[0 à 5]	1	Lég1	12	15%	Nombre moyen / an
[6 à 20]	2	Lég2	20	26%	
[21 à 30]	3	Lég3	26	33%	
[31 à 50]	4	Lég4	20	26%	
Nombre d'espèces associées sur 10 ans					
[0-10]	1	Esp1	11	14%	Nombre moyen / an
[11 à 30]	2	Esp2	16	21%	
[31 à 60]	3	Esp3	23	29%	
[61 à 90]	4	Esp4	28	36%	
Nombre de cultures associées sur 10 ans					
[0-10]	1	Ass1	11	14%	Nombre moyen / an
[11 à 30]	2	Ass2	23	29%	
[31 à 60]	3	Ass3	28	36%	
[61 à 90]	4	Ass4	16	21%	
Durée de la jachère / 3-120 mois					
[0 à 2]	1	Jach1	40	51%	Mois
[3 à 6]	2	Jach2	27	35%	
[60-120]	3	Jach3	11	14%	
Fréquence d'apport de matière organique l'an					
[1 à 2,5]	1	MO1	16	21%	Echelle de 1 à 10
[3 à 5]	2	MO2	24	31%	
[6-7,5]	3	MO3	18	23%	
[8-10]	4	MO4	20	26%	
Dose moyenne annuelle d'engrais chimique					
[0 Kg]	1	Eng1	40	51%	Kg/ha/an
[40 à 265]	2	Eng2	19	24%	
[270 à 1636]	3	Eng3	19	24%	
Nombre des rotations sur 10 ans					
[0]	1	Rot1	12	15%	Nombre / 10 ans
[2 à 4]	2	Rot2	20	26%	
[5 à 6]	3	Rot3	19	24%	
[7 à 10]	4	Rot4	27	35%	
Dose moyenne annuelle de pesticide pur					
[0]	1	Pest1	11	14%	1 ha ⁻¹ an ⁻¹
[1 à 9]	2	Pes2	24	31%	
[10 à 15]	3	Pest3	20	26%	
[16 à 36]	4	Pest4	23	29%	
Nombre d'arbre par ha					
[1 à 5]	1	Arbre1	17	22%	Nombre/ha
[6 à 9]	2	Arbre2	24	31%	
[10 à 15]	3	Arbre3	20	26%	
[26 à 36]	4	Arbre4	17	22%	

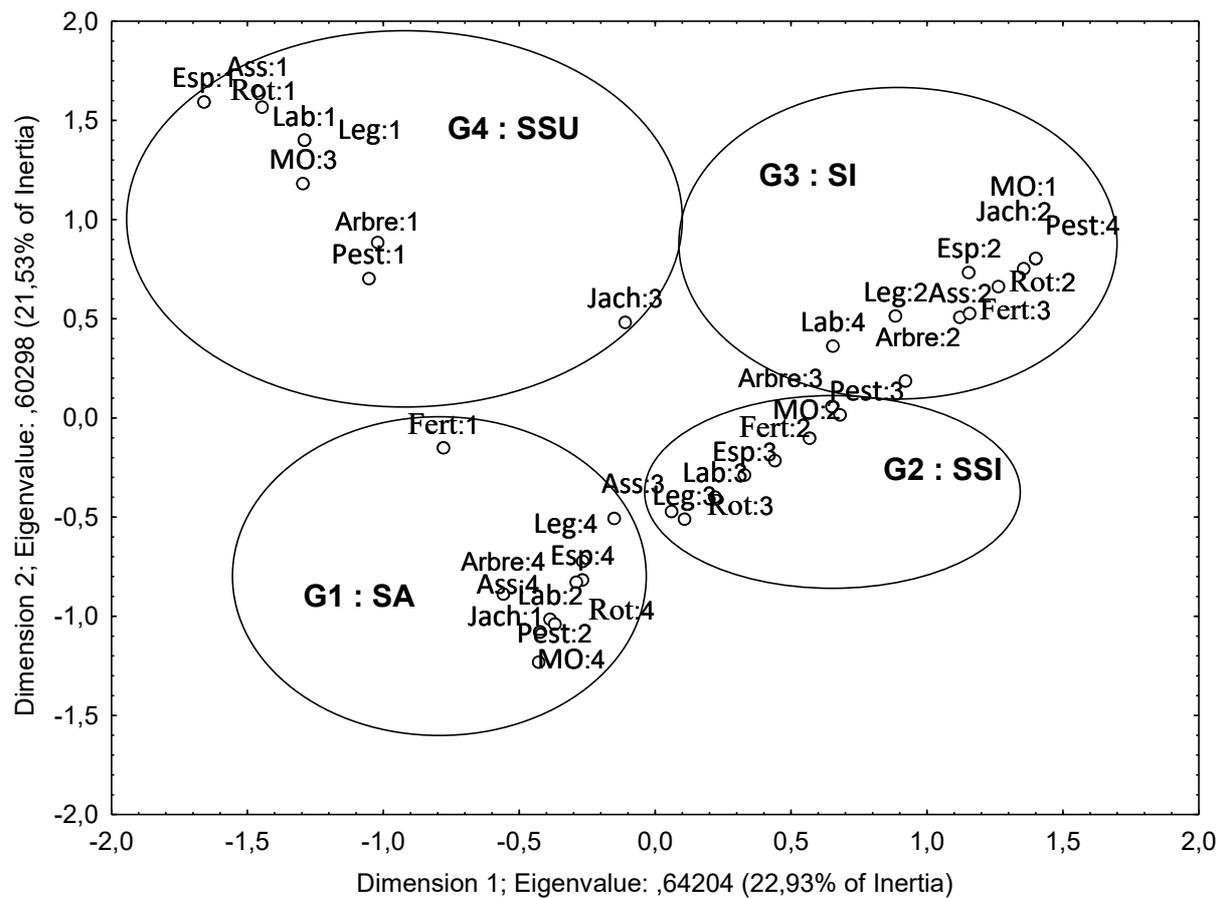


Figure 35 : ACM des variables de caractérisation des systèmes culture. Fert : Fertilisation ; Jach : Durée de la jachère ; Pest : Pesticide ; Arbre : nombre d'arbres dans la parcelle ; MO : apport de matière organique.

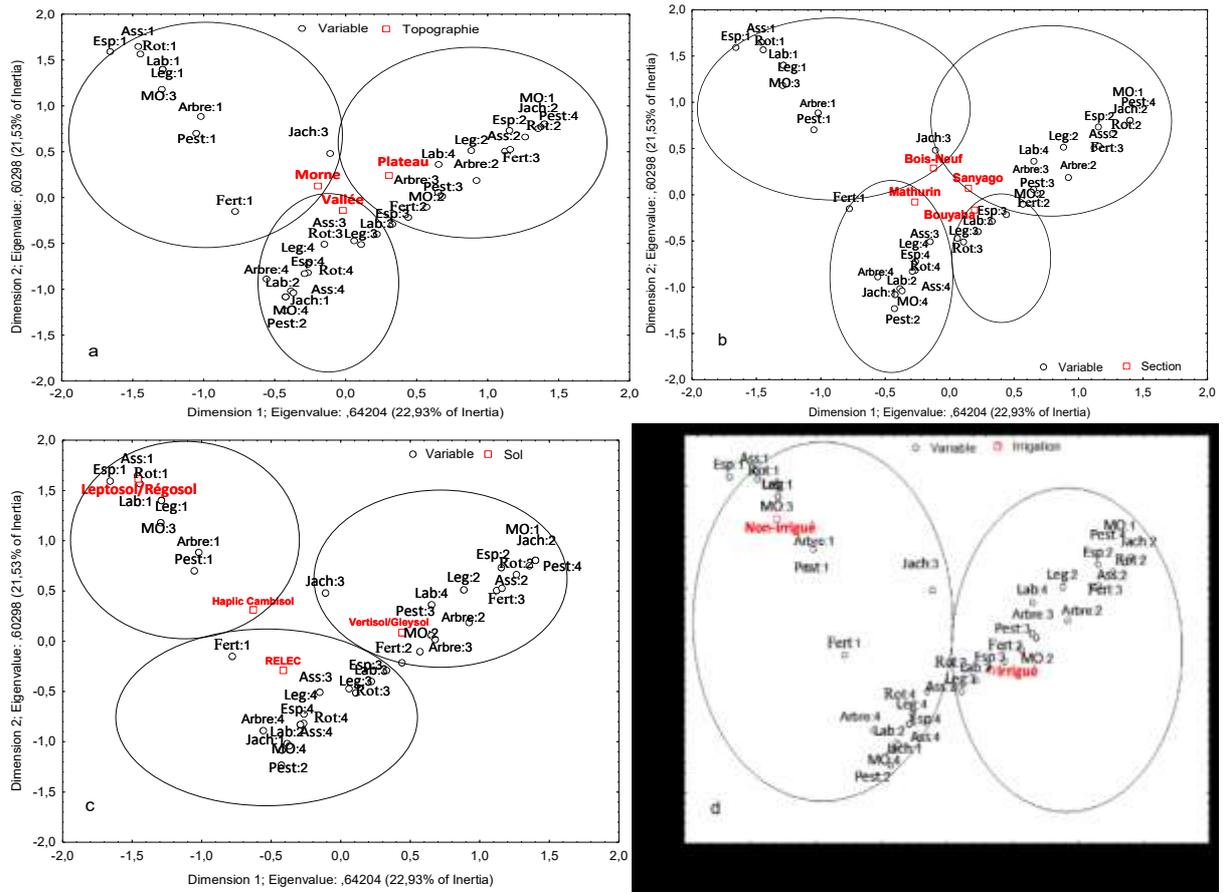


Figure 36 : Introduction des variables supplémentaires sur le plan de l'ACM. a : Topographie ; b : Section communale ; c : Classe de sol et d : Irrigation

3.2. Description des variables de caractérisation des systèmes de culture

L'analyse descriptive révèle que, pour tous systèmes confondus, le nombre de labour moyen varie de 5 à 30 suivant une moyenne de 15,6 et une médiane de 15 sur 10 ans. Ainsi, 57% de terres sont labourées à l'aide de la traction bovine, 30% manuellement à l'aide de machettes, houes et pioches. Seulement 13% des agriculteurs achètent le service de labourage par tracteur mécanique lié aux cultures maraichères et du riz au plateau irrigué. Le système agroforestier (SA) a une densité moyenne de 19 arbres à l'hectare. Le système intensif (SI), le plus labouré, a une densité de quatre arbres à l'hectare. Aucun soin n'est apporté spécifiquement aux arbres à l'exception du cacaoyer où un élagage s'effectue juste avant la saison pluvieuse. Les apports d'engrais varient de zéro en SA à 1636 kg ha⁻¹ an⁻¹ en SI. Trois formules sont utilisées dans une campagne culturale en SI pour les cultures maraichères et du riz : le 12-12-20 (182 kg ha⁻¹) appliqué au cours de la transplantation du riz et des maraichères ; l'urée : 46-0-0 (182 kg ha⁻¹) après leur désherbage et le Diamine-Phosphate (DAP) : 18-46-0 (182 kg ha⁻¹) ou les sulfate d'ammonium ((NH₄)₂SO₄) appliqués juste avant leur montaison. Le nombre d'espèces cultivées varie de 1 en SI à 9 en SA suivant une moyenne de six espèces par an. La diversité des espèces pérennes est aussi importante en SA. La plus faible diversité des cultures et d'espèces pérennes est observée en SI. L'utilisation de pesticides et d'engrais est systématique sur les cultures maraichères et du riz cultivés en SI et, est raisonnée en fonction de l'incidence des ravageurs et de maladies dans les autres SC (Tableau 32). En sus des herbicides (trichel), fongicides (ridomil, muscle-ADV) et insecticides (selecron-profenofos, actara) ont été inventoriés. Dans le SSU le pâturage des caprins et bovins est observé toute l'année moyennant l'existence fourragère. Il est également observé lors des intercultures courtes appliquées en SI et des jachères de trois à six mois en SSI.

Tableau 32 : Résumé de la description des systèmes de culture. Les 30 l de pesticides utilisés sur l'année sont considérés comme des produits purs et non en bouillie appliquée.

Critères	Système intensif (SI)	Système semi-intensif (SSI)	Système agroforestier (SA)	Pâturage permanent (SSU)
Fonciers actifs et irrigation	0,4 ha Hab ⁻¹ ; Irrigation	0,6 ha Hab ⁻¹ ; Non irrigué	0,54 ha Hab ⁻¹ ; Non irrigué	Taille relativement grande (3,5 à 10 ha en moyenne)
Travail du sol	3 labours par an, 25 à 35 cm de profondeur	1 ou 2 labours par an ; épaisseur 15 à 20 cm	Travail très superficiel/5-8 cm ; 1 labour superficiel	--
Durée moyenne jachère et longueur rotation	1 mois ; Retour occasionnel des légumineuses	3 à 6 mois. Retour d'au moins une légumineuse chaque 2 ou 3 ans	0 mois. Retour annuel, en relais, de Pois-boussoucou, Haricot et Pois-congo et inconnu	60-120 mois. Absence légumineuse
Espèces cultivées	Riz ; Poireau-carotte-betterave-gombo-épinard-maïs ; Haricot-maïs	Canne-à-sucre (95 %) + banane ; Pois congo-maïs-haricot-pois inconnu-Gombo Patate-Manioc-épinard-banane	Cacao-Igname-Banane-Haricot-Pois-congo-Pois-boussoucou-Manioc-Patate-Taro / Épinard, Mirliton et Gombo	--
Intrants et Nombre d'applications par an (ap. an ⁻¹)	30 l ha ⁻¹ an ⁻¹ pesticide : 9 ap. an ⁻¹ 1,6 t ha ⁻¹ an ⁻¹ engrais : 9 ap. an ⁻¹	7.5 l ha ⁻¹ an ⁻¹ : 3 ap. an ⁻¹ 0,36 t ha ⁻¹ an ⁻¹ : 2 à 3 ap. an ⁻¹	0 engrais ; pesticides occasionnels 2,5 l ha ⁻¹ an ⁻¹	--
Apport matières organiques	Peu ; brulis juste après récolte	Relativement faible	Apport important ;	Apport dans les racks
Conservation des sols et densité arbres	Aucune ; couverture arborée ± (manguier, avocatier, citrus)	Modérée, Gabion, bandes enherbées. Plateau ± couvert (manguier, avocatier, citrus, cocotier)	bandes enherbées. Couverture végétale ± dense	2 situations : sols nus, sols boisés (pâturage, exploitation de bois et de fourrage)
Topographie associée	Essentiellement plateau irrigué	Plateau non irrigué (60%)	65% en vallée	70% aux versants
Classes de sols associées % de la couverture	100% Vertisols/Gleysols	60% Leptosols	60% Leptosols	80% Leptosols
Texture des sols, % de la couverture	100% argileux	65% argileux	65% limoneux	85% limono-sableux

3.3. Perception des agriculteurs à l'égard des sols

Les agriculteurs les plus instruits (25%), ayant atteint le niveau d'études secondaires, pensent que la matière organique (MO) rend les sols plus productifs. Ils rapportent que plus un sol contient de la MO, plus il est noir. L'ensemble des agriculteurs ne sont pas au courant et n'ont pas perçu d'effets des légumineuses sur les sols. Ils décrivent un sol de mauvaise qualité comme un sol ne pouvant plus rien produire. Pour prédire l'état de fertilité, ils tiennent compte du degré de pierrosité, de la pénibilité du travail du sol et de sa profondeur et de la proportion d'arbres dans la parcelle. Ils mentionnent que les sols de bonne qualité sont de couleur noire ayant une bonne couverture végétale et un rendement satisfaisant. Ceux dont leurs parcelles sont positionnées aux versants précisent que le sol est lavé. Pour les trois systèmes cultivés (SI, SSI et SA), 64% des agriculteurs témoignent d'une baisse de rendement pour les cultures dominantes (riz, cultures maraichères, canne-à-sucre), 15% rapportent un maintien et 21% en témoignent d'une augmentation de rendement de ces cultures. Parmi ces derniers, 87% font référence au système agroforestier (SA) (Tableau 33). Ces agriculteurs précisent que l'agroforesterie est un grenier. Une même ferme intègre souvent un ou plusieurs des systèmes de culture que nous avons identifiés dans notre typologie et il existe des liens entre ces systèmes. 1) transfert de fertilité et de graines d'adventices en SSU servant de pâturage diurne pour les animaux de la ferme, vers les autres systèmes. Ces transferts se font via le parcage nocturne du bétail en SA et via les transferts de fumier en SI et SSI en provenance du SSU et en SA. 2) Quelques denrées comme le maïs, le haricot et le pois-congo, issues de SA sont utilisées comme semences en SI et SSI. 3) les recettes issues de la vente des légumes en SI sont utilisées pour l'achat des semences pour les autres systèmes. 4) La main d'œuvre agricole est essentiellement familiale et des risques de compétition existent donc entre les parcelles. En vue de gérer le risque de compétition entre parcelle, les agriculteurs ont recours en SI à la main d'œuvre rémunérée à 50%.

Tableau 33 : Perception des agriculteurs sur l'évolution du rendement des cultures de céréales au cours de ces 10 dernières années. Les 11 parcelles faisant partie du système de pâturage permanent (SSU) ne sont pas incluses.

Réponse	Nombre d'agriculteurs	Fréquence total	% en SA	% en SSI	% en SI
Forte augmentation	14	21	87	0	13
Stabilité	10	15	13	39	48
Forte régression	43	64	0	61	39
Total	67	100	100	100	100

4. Discussion

L'ACM nous a permis de faire ressortir plusieurs traits de discrimination des SC. Parmi ceux-ci, le pâturage permanent, la fréquence de légumineuses, la diversité spécifique et le labour sont surement les plus importants à noter. En effet, les références bibliographiques suggèrent que ces pratiques sont les plus susceptibles d'affecter la durabilité des systèmes de culture, car on se trouve sur des systèmes à faible niveau d'intrants pour la plupart, où la régulation naturelle des ressources et les leviers pour l'activer (ou la détruire) jouent un rôle déterminant. L'usage de pesticides et d'engrais ne semblent pas déterminants puisque les surfaces concernées sont très faibles.

Notre analyse révèle que plus le labour est fréquent au niveau du périmètre irrigué pour les cultures maraichères et du riz, plus les traitements phytosanitaires et la fertilisation chimique sont importants. L'association de ces techniques est cohérente avec Feller et al. (1990) montrant que plus les terres sont travaillées, plus la teneur en matière organique du sol diminue et, plus les besoins en intrants chimiques sont importants. Du fait de l'utilisation importante de pesticides chimiques, la régulation naturelle des bioagresseurs des cultures à long terme pourrait aussi être fortement diminuée dans le cadre de ces systèmes (Clermont-Dauphin et al., 2004).

Mise à part de l'interculture courte observée en SI, La durée des jachères varie de trois à six mois en SSI. Nous avons constaté que les terres où elle excède cinq ans sont celles abandonnées en raison de la baisse importante de fertilité, c'est le cas du SSU. Ces terres sont surtout consacrées à l'élevage caprin. Il apparait de multiples convergences avec les travaux de SACAD-FAMV (1994) indiquant que ces terres ne supportent aucune culture. Ils les surnomment « jardin Cabrit ». Elles sont caractérisées par de fortes pentes et de sols très érodés néoformés sur substrat calcaire. Jean-Denis et al. (2014) rapportent que ce groupe (Type D

selon eux) est consacré à l'exploitation des bois et de fourrages. En SI, la productivité est maintenue grâce à l'usage important d'engrais où quatre campagnes culturales peuvent s'effectuer selon la disponibilité en eau et la tenure foncière. Pour cette raison, la succession culturale d'une année ne se répète pas forcément dans l'année suivante en SI. En SSI, les rotations des légumineuses (*Vigna unguiculata* et *Cajanus cajan*) s'effectuent suivant un cycle régulier puisque les conditions permettent de faire une ou deux campagnes sur l'année. Une jachère de 3-6 mois, liée à la saison sèche et associée avec des rotations des légumineuses, peut maintenir la fertilité et la productivité des sols comme le stipulent les travaux de Samaké et al. (2006) et de Villenave et al. (2022). Localement, les résultats des travaux du CHCL et al. (2022) l'ont affirmé en SSI, suggérant une meilleure teneur en matière organique ($\geq 4,5 \text{ g kg}^{-1}$) après le SA.

En Afrique de l'Ouest, de nombreux travaux ont montré la réduction des risques d'érosion et le maintien de la biodiversité par la pratique de jachères et la diversité des cultures (Wezel et Haigis, 2002 ; Manlay et al., 2004 et Hauser et al., 2006). L'association entre fréquence élevée des légumineuses, présence importante d'arbres, faible dose d'engrais et de pesticides est aussi cohérente au niveau agronomique. L'implémentation de telles pratiques correspond au système agroforestier (SA). Courte et al. (2019), dans leur typologie, les ont attribuées au système à faible impact qui, selon Jean-Denis et al. (2014), est positionné à proximité de la maison de l'exploitation familiale (Jaden Lakou). C'est aussi le groupe dont la restitution organique est jugée plus importante car toutes les strates végétatives y sont présentes (arborescente, arbustive, herbacée et lianescente). Il est le noyau de l'exploitation agricole. Le G2 de notre typologie (SSI) est caractérisé par les cultures annuelles conduites en association, qu'elles soient vivrières ou de rente (canne-à-sucre, maïs, sorgho, haricot, racines et tubercules, légumes). Contrairement à SACAD et FAMV (1994), il s'agit réellement d'un système semi-intensif caractérisé par : une haie arbustives entourant la parcelle, des jachères de 6 mois et l'usage modéré d'intrants chimiques. Le G3 se rapproche du type suggéré par Courte et al. (2019) dit système à impact fort correspondant à la micro zone de culture irriguée de Saint-Raphaël. Il est généralement éloigné de la maison de l'EA. Toutefois, en tenant compte de son mode de tenure foncière dominé par le fermage et sa position par la maison, ce groupe correspond au type C de SACAD-FAMV (1994).

En vue de diminuer les risques de perte de rendement, les agriculteurs ont recours consciemment ou non, à l'augmentation de la diversité des espèces en association. Gil et al. (2017) et Michael Smith (2021) ont signalé des effets positifs des associations mixtes. Ces

pratiques sont prometteuses lorsque la disponibilité en azote des sols est faible (Naudin et al., 2010). C'est dans le SA que le niveau de transition agroécologique, au sens de « l'outil Tape » de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (2021), serait le plus élevé. La perception des agriculteurs sur l'amélioration des rendements en agroforesterie rejoint les résultats de Sileshi (2016) qui montrent une amélioration des caractéristiques chimiques des sols et une augmentation de la productivité des cultures dans un tel système comparé aux cultures pures.

La vulnérabilité été définie comme le potentiel de perte de ressources et de capacités à y réagir (Chuku et Okoye, 2009). A Saint-Raphaël, la vulnérabilité des SC est importante. Elle est façonnée par l'exposition croissante à des risques majeurs associés au changement climatique et aux fortes pentes des parcelles cultivées. Plus de 10 cyclones ont été enregistrés en 20 ans. Nous avons vu que les agriculteurs étaient sensibles à ces facteurs climatiques (températures et pluviosité). Notre enquête a montré qu'il y a chez les plus instruits une sensibilité à la dégradation du milieu (Nadeau et al. 2018). Cette vulnérabilité est aussi façonnée par le contexte socioéconomique, politique et biophysique. Le manque d'encadrement technique, évoqué par 52% des enquêtés, et d'accès aux moyens de production sont patents. Nous basant sur les données d'enquête, notre analyse rejoint les perceptions des agriculteurs sur l'évolution des rendements et les sols. La majorité des graines et des ressources génétiques animales sont échangées et autoproduites. Celles de cultures maraichères sont les seules achetées régulièrement. Si l'on s'attache aux éléments climatiques, 40% des agriculteurs enquêtés indiquent que les températures ont augmenté et que les pluies sont plus rares et les périodes de déficit hydrique pour les cultures se sont allongées. Les plus instruits évoquent des conséquences en termes d'ensablement de cours d'eau alimentant le plateau irrigué, de baisse des rendements et d'accélération de la dégradation des sols comme le stipulent les travaux de Magamana et al. (2021). Les versants (37,5%) sont exploités sans structures antiérosives. Les projets d'aménagement, quasi absents, semblent n'avoir eu qu'une efficacité limitée. Sur le plan socio-économique, l'accès au crédit est limité, pas d'assurance et de mécanismes de soutiens communautaire et public. Aucun cadre légal et de gouvernance pour la protection de la biodiversité n'est appliqué. Le SI est le seul système où la main d'œuvre rémunérée existe réellement. La coupe abusive de bois alertée depuis 1993 par Smolikowski, effectuée en majeure partie dans les versants (SSU et SSA), est une des principales alternatives pour une amélioration de revenu pouvant être réinvestie dans les cultures de rente. Cette trésorerie est réinvestie par l'achat des semences et du service de labourage en SI et en SSI. Les jeunes qui

représentent 20% de la population s'adonnent à d'autres activités rémunératrices (taxi moto). Le flux migratoire et l'exode rural sont des sources d'entrée de capital important pouvant être investis dans l'activité agricole. Le retour de l'argent par les migrants au sein de l'EA est réinvesti par l'achat du bétail (caprins, bovins) et par l'acquisition foncière. Il sert également à la couverture des besoins alimentaires du ménage agricole. De toute évidence, les agriculteurs n'ont ni moyens, ni connaissances pour prendre en compte les processus écologiques (la décomposition de la MO par les microorganismes, la dynamique des populations, l'érosion du sol, photosynthèse nécessaire au stockage de carbone dans le sol, etc.) et leurs services dans le raisonnement de leurs pratiques. En fait, les systèmes actuels semblent présenter de gros problèmes de durabilité.

5. Conclusion

La distribution de nos quatre types de systèmes de culture (SC) semble fortement liée à la combinaison de la topographie, du type de sol (qui conditionne leurs potentialités agronomiques) de l'accès à l'irrigation et de la distance à l'exploitation. Nos résultats reflètent de multiples convergences, pour quelles que soient les variables retenues, avec ceux réalisés antérieurement au Sud du pays et dans la caraïbe. L'hypothèse de départ affirmant la diversité des systèmes de culture caractérisée par les espèces présentes et la diversité des pratiques culturelles a été testée. Ces traits sont facilement accessibles et peuvent être mobilisés en vue d'évaluer les performances agro-environnementales des SC et de raisonner des améliorations de gestion. Ainsi, la santé du sol, la biodiversité agricole et la productivité font partie des critères de performances agro-écologiques à évaluer dans nos travaux futurs à partir de ces traits. Les perceptions des agriculteurs sur les sols et les techniques culturales implémentées ont indiqué une évolution importante des processus de dégradation dans le cadre de la plupart des SC, ainsi que le rôle joué par un couvert arboré pour empêcher cette dégradation. Nos résultats suggèrent que les processus écologiques des sols interviennent cependant peu dans leurs décisions techniques. Dans un tel contexte, une approche d'évaluation des SC en place à partir d'un dispositif on-farm, et en interaction forte avec les agriculteurs de la région serait à la fois pertinente sur le plan scientifique et efficace pour développer les connaissances et l'autonomie des agriculteurs en vue de l'amélioration de leurs pratiques.

**CHAPITRE V⁵ : STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE DE SOLS EN HAÏTI :
ANALYSE DE L'EFFET DE SYSTEMES DE CULTURE DE LA COMMUNE DE
SAINT-RAPHAËL, NORD D'HAÏTI**

❖ ⁵ Publié : **Dorvil W.**, 2024. 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, pp. 43-58. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2023/11/EGS_2024_31_Dorvil-et-al_43-58.pdf.

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

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 $2,83 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ dans la couche 0-30 cm et de $1,93 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ dans la couche 30-50 cm, et un stock moyen de $97,5 \pm 45,7 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ à $35,4 \pm 18,5 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ respectivement. Les stocks les plus élevés (couche 0-30) sont observés dans le système agroforestier SA ($113,3 \pm 59,3 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$) et les plus faibles dans le système de pâturage permanent SSU ($87,4 \pm 41,2 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$). Le stock organique de la couche 0-30 cm varie de $38,3 \pm 16,4 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ pour les Haplic Cambisols à $119,45 \pm 55,6 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ pour les Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols. Dans la couche 0-50 cm, il varie de $112,0 \pm 37,0 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ dans les versants à $150,2 \pm 40,1$ dans les vallées. Si l'effet des types de sol sur le niveau du stock peut être retenu en première analyse, un effet significatif des systèmes agroforestiers présents pour la couche 0-50 cm est documenté. La nature calcaire 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.

Mot-clés

Agroforesterie, Système intensif, Système semi-intensif, Pâturage permanent, Fertilité, Qualité des sols, Zone tropicale humide, Matière organique.

SUMMARY

Soil organic carbon stocks in Haïti: assessing the effect of cropping systems in the commune of SAINT-Raphaël, North of Haïti.

Storing organic carbon in soil can effectively help to restore soil quality in Haïti, 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 Haïti 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 $2.83 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ 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 a significant effect of the agroforestry on the stocks levels down to 0.5 m depth. The calcium or carbonate nature of soils is significant 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.

Keywords

Agroforestry, Intensive system, Semi-intensive system, Permanent pasture, Fertility, Soil quality, Tropical humid zone, Organic matter.

RESUMEN

Estoque de carbono orgánico en suelos de Haití: evaluación del efecto de sistemas de cultivo en la comuna de Saint-Raphaël, norte de Haití.

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 $97,5 \pm 45,7 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ a $35,4 \pm 18,5 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivamente. Los estoques más elevados de la capa 0-30 cm se encuentran en el sistema agroforestal SA ($113,3 \pm 59,3 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$) y los más bajos en el sistema de pastoreo permanente SSU ($87,4 \pm 41,2 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$). El estoque orgánico de la capa 0-30 cm varía de $38,3 \pm 16,4 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ para los Haplic Cambisols a $119,4 \pm 55,6 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ para los Rendzic Leptosols y Epileptic Cambisols. En la capa 0-50 cm, los estoques varían de $112,0 \pm 37,0 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ en las laderas a $150,2 \pm 40,1 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ en situaciones en los valles. Si bien el efecto de los tipos del suelo puede considerarse en primer análisis, observamos un efecto significativo 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. La matière organique 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 aux 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 démontrée en indiquant un stock de C en dessous de 30 MgC ha⁻¹ des sols érodés d'Haïti. Il en est de même des causes anthropiques liées aux pratiques agricoles inappropriées dans les versants provoquant la baisse de la couverture végétale (Dolisca et al., 2007). À noter que lorsque les sols sont dégradés, ils perdent toutes leurs propriétés : physiques, chimiques, biologiques et écologiques, donc leur potentiel de fertilité est 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 (COS), nécessite d'identifier des pratiques agricoles adaptées aux conditions locales qui augmentent les flux d'entrée de C dans les sols en diminuant 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 carbone organique des sols (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 FAO (2017), de Lal (2020). D'autres études, comme celles de la FAO (2017), de Ramesh et al. (2019), de Chenu et al., (2014), de Chevalier et al., (2020) suggèrent une diversité de pratiques séquestrantes de carbone organique comme le travail superficiel, l'agroforesterie, les cultures intermédiaires, les haies, les bandes enherbées, etc.

Les études mettant en relation les systèmes de culture et le stock de carbone des sols ont été, comparées à d'autres régions, peu développées en région Caraïbienne. On peut citer les travaux

de Feller et al., (1990, 2006), d'Albrecht et al., (1992) et de Dulormne et al., (2000). 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 d'Haïti, 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'en ont pas été pris en compte. De plus, seulement l'horizon de surface du sol (0-20/0-30 cm) a 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 des systèmes de culture sur le stock de carbone organique. Nous le proposons dans cette étude. Par ailleurs notre travail devrait permettre d'apprécier leur variabilité en fonction des systèmes de culture et des types de sols. Ce travail 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 carbone des systèmes existants.

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

2. Résultats

2.1. Principales propriétés physico-chimiques des sols

Les sols échantillonnés présentent en moyenne une texture argileuse (Tableau 34), dont il faut pondérer le caractère tant la variabilité des données est importante. Les valeurs moyennes de densité apparente des sols sont élevées $> 1,2 \text{ g cm}^{-3}$. Le pH des sols est neutre (6,5-7,5) à basique (7,5-8,7). La conductivité électrique dépasse légèrement les 4 dS m^{-1} et traduit une mise en solution de sels qui expriment la composition ionique des solutions du sol et les pH observés (Job, 1985). Dans la couche 0-30 cm, la teneur moyenne en azote total est de $0,24 \text{ g kg}^{-1}$. Jugée faible, on voit seulement 11,5% des profils avec une teneur supérieure à $0,4 \text{ gNt.kg}^{-1}$. Notons également que les différences entre 0-30 et 30-50 cm de profondeur sont significatives ($p < 0,05$) pour la teneur en Ntotal et la conductivité électrique. 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).

Tableau 34 : Effet de la profondeur du sol sur les différents paramètres physico-chimiques des sols.

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

* : p<0.05 effet significatif ; ** : p>0,05 effet non significatif ; CT = COT+CIT; E-t. : écart-type ; C/N = COT/N total

2.2. Les densités apparentes (Da)

La densité apparente, exprimée en g cm⁻³, dans la couche 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 37a). 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 38b présente les moyennes homogènes des deux méthodes de prélèvement. Nous n'observons pas de différences significatives des Da entre les systèmes de culture (Figure 37c).

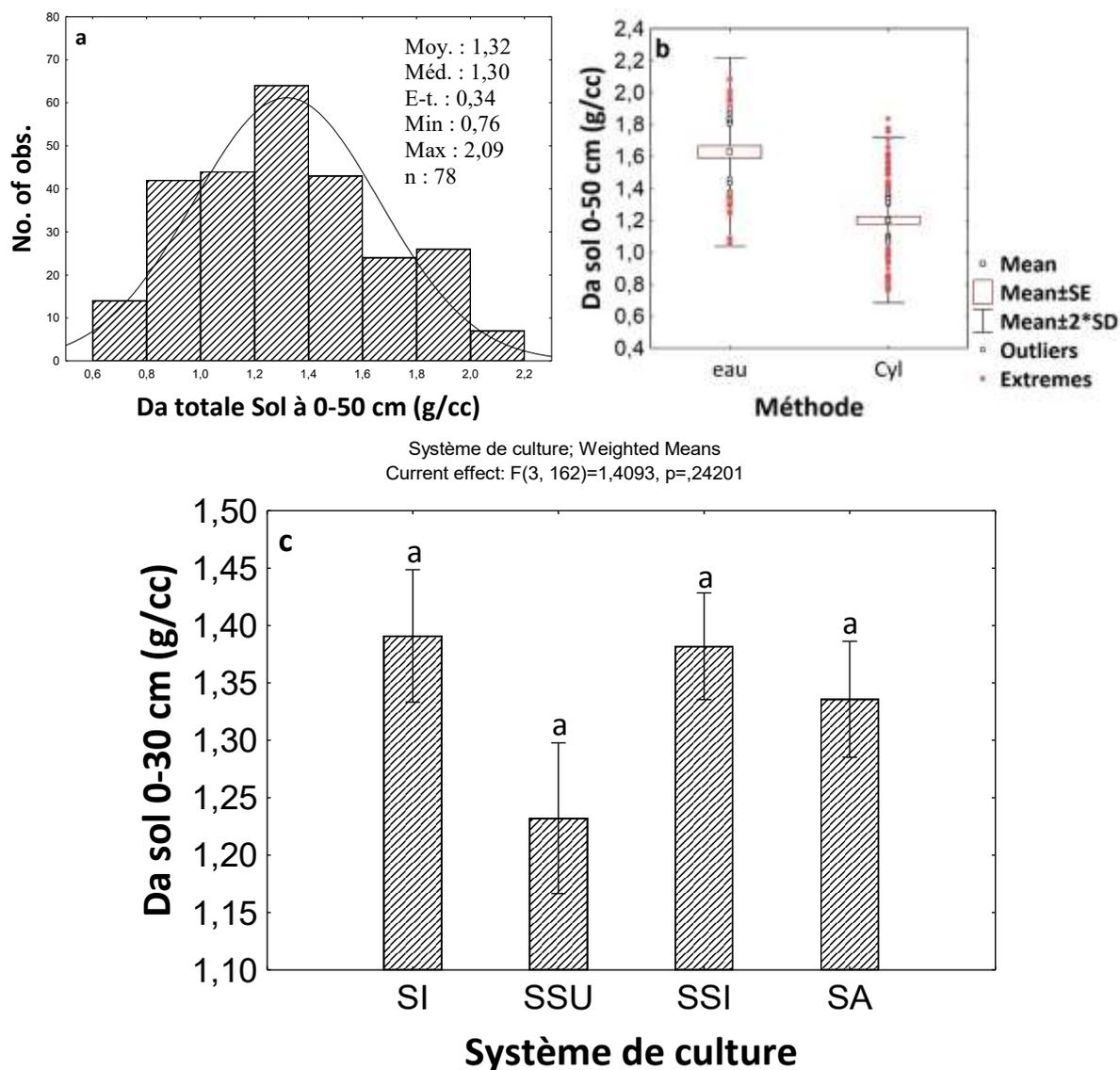


Figure 37 : Histogramme de distribution des valeurs de densité apparente (Da en g cm^{-3}) de la couche 0-50 cm des 78 parcelles (a) ; distribution des Da avec les deux méthodes de mesure (b) ; comparaison des moyennes des valeurs de Da par système de culture de la couche 0-30 cm (c).

2.3. 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 $2,83 \text{ gC } 100 \text{ g}^{-1}$ (Tableau 34) avec des mesures comprises entre 2,55 (SI) et $3,32 \text{ gC } 100 \text{ g}^{-1}$ (SA) (Tableau 35). Dans la couche 0-50 cm, la teneur moyenne en COT est de $2,57 \text{ gC } 100 \text{ g}^{-1}$ et varie de 0 à $9,71 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ (Figure 38a). Les différences sont significatives entre les systèmes de culture, d'après le test de comparaison de Fisher LSD (Tableau 35) : pour la couche 0-30 $\text{SA} > \text{SI} = \text{SSI} = \text{SSU}$; 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.

Tableau 35 : 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).

	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 indiquent qu'il n'existe pas d'effet significatif (NS) au seuil de 5%.

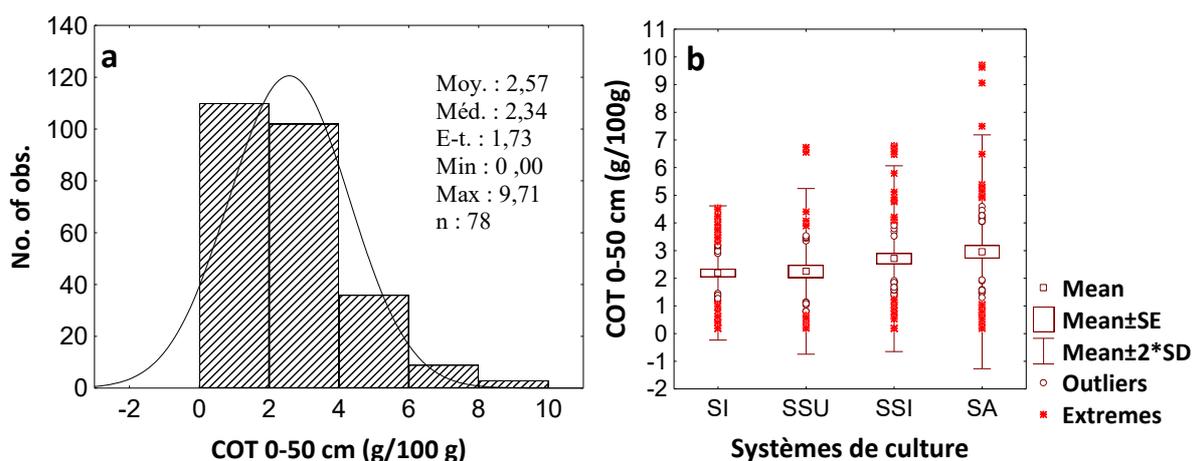


Figure 38 : Concentrations en COT des couches 0-50 cm de sol, a) histogramme de distribution ; b) valeurs dans les quatre systèmes de culture.

2.4. Stock 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 39 et Tableau 37). 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 ($97,3 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$), les Gleysols ($78,9 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$), les Régosols ($59,0 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$), les Leptosols ($55,6 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$), et enfin les Haplic Cambisols ($38,3 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$) (Tableau 36). 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.

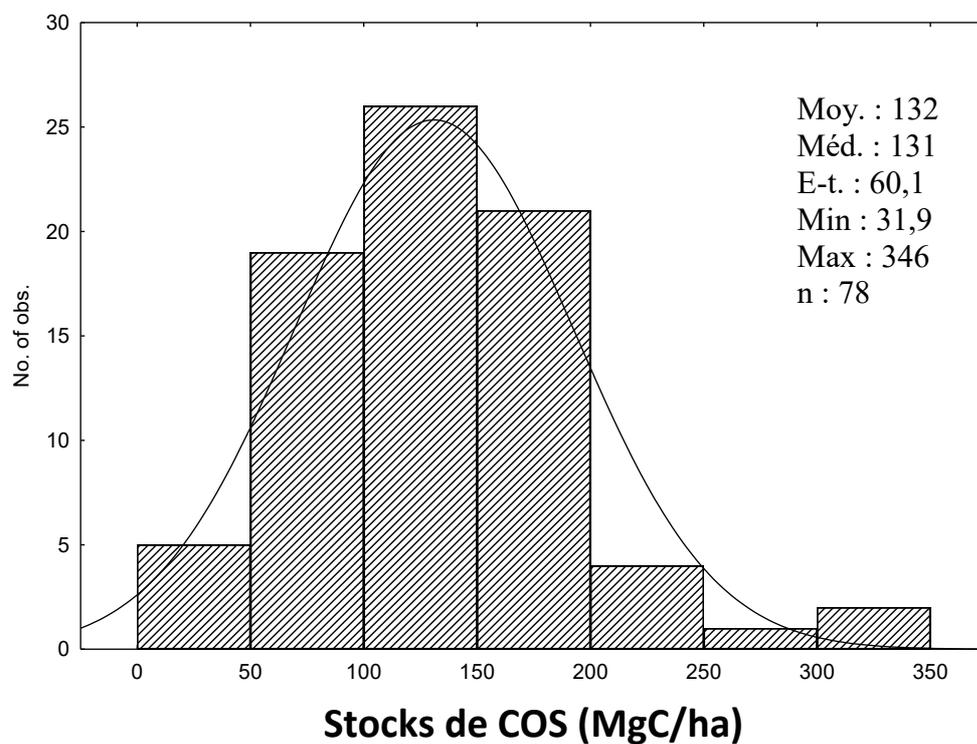


Figure 39 : Histogramme de distribution des stocks de carbone organique ($\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$) de la couche 0-50 cm des sols des 78 parcelles.

Tableau 36 : 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.

Sol	SC*	N	0-30 cm			30-50 cm				
			Moy.	Min	Max	N	Moy.	Min	Max	Effet profondeur
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 (NS) au seuil de 5% sur le stock de COS ; n : nombre de profils pédologiques ; E-t. : écart type ; Moy. : Moyenne. RELEC* : Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols.

2.5. 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 observée 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.

Tableau 37 : Variation des stocks de carbone organique (MgC.ha⁻¹) (COS, moyenne ± écart type) en fonction des systèmes de culture, de la position des parcelles dans le paysage et de la profondeur.

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

3. Discussion

Les sols de Saint-Raphaël présentent des ensembles de sols argilo-limoneux sur les plateaux et sablo-limoneux sur les versants (Tableau 36). 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.100g⁻¹ pour la couche 0-30 cm et de 2,57 gC.100g⁻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. La mesure des Da par deux méthodes pourrait être questionnée. 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). Les valeurs inférieures de la population de SSU sont à relier à un effectif limité (11 sites). 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 notoire 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 présupposons 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 39) indique une variabilité morphopédologique (Tableau 36), 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 40 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 38 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 MgC.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 MgC.ha⁻¹) ou en Guyane française (Courte et al., 2019 ; stocks compris entre 11 et plus de 275 MgC.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 36 et 37). Les systèmes agroforestiers (SA) et du pâturage permanent (SSU), présentant respectivement les valeurs de stocks organiques les plus élevées et les plus 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 37). Un effet du type de sol, de la profondeur du sol et de la topographie sur l'expression des stocks est constaté également (Tableaux 35 et 36). 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 36). La moyenne est centrée sur 15 mesures entre 100 et 150 MgC. ha⁻¹, puis 7 mesures > 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 (Demenois et al., 2017).

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 36 ; Figure 40). 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-organico-minéraux (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. Le rôle de cette fraction 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 le 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, les sols à halloysite, et les Ferrisols.

Le rôle des carbonates dans la stabilisation et la protection des matières organiques reste posé. L'importance des carbonates de calcium et de magnésium dans la stabilisation des matières organiques a été soulignée (Garcia-Franco et al., 2021 ; Zamanian et al., 2021). C'est le cas de Saint-Raphaël où les fortes teneurs en CIT s'observent en SA suivant une variation de 2,61 g 100g⁻¹ en situations de versants (SSU) à 4,15 g 100g⁻¹ en situations de vallée (SA). 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 élevés 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 36).

Tableau 38 : Valeurs de stock de carbone organique ($\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$) de sols de la région caribéenne.

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

RELEC* : Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols

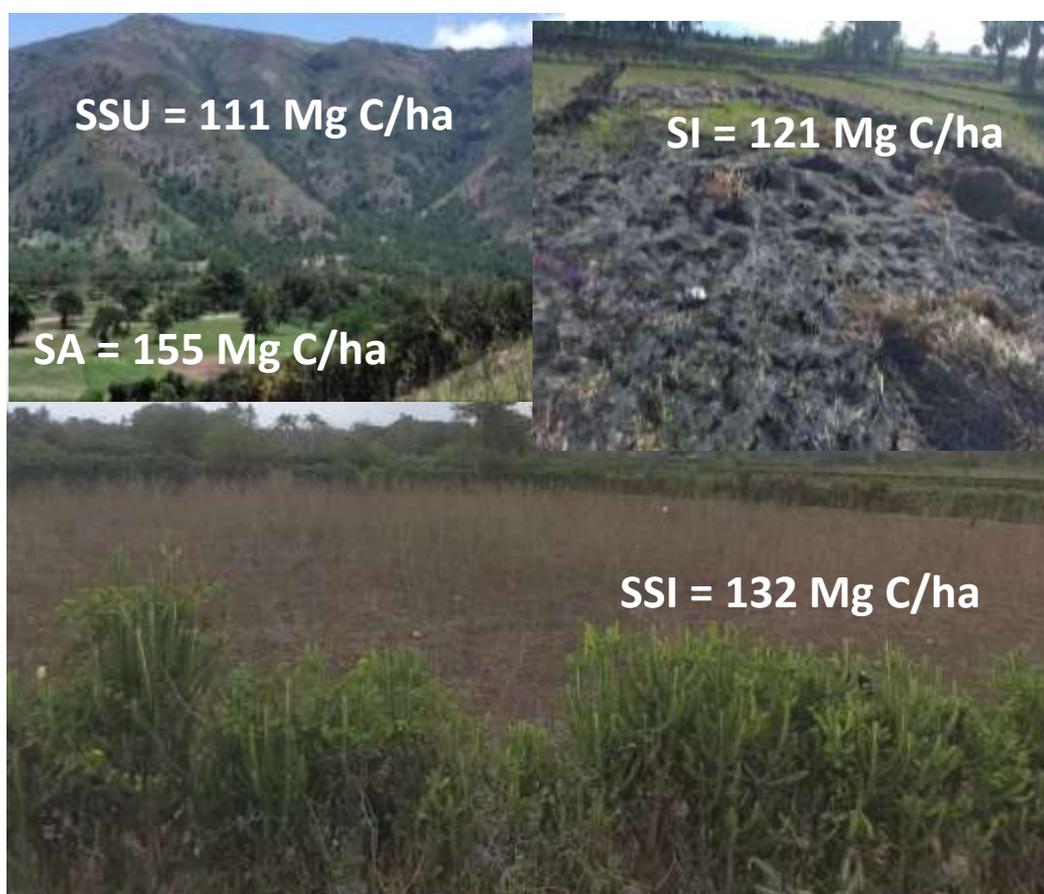


Figure 40 : Les systèmes de culture dans la morphologie du paysage et valeurs moyennes des stocks de carbone organique associés (couche 0-50 cm) à Saint-Raphaël.

En Haïti, Feller et al. (2006) ont rapporté que les déterminants du stock de COS étaient la texture et le pH du sol (Tableau 37). Leurs résultats sont conformes aux nôtres indiquant respectivement des stocks moyens de $97,27 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ et $119,45 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ dans les Vertisols et les RELEC à 0-30 cm. Sur cinq sites agroforestiers inventoriés par IDIAF (2010) en République

Dominicaine, 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 sont notablement différents de ceux issus de notre système agroforestier estimés à 3,32 gC. 100 g⁻¹ (Tableau 34). Nous constatons que les pratiques agroforestières (SA) attribuées, selon Courte et al. (2020), aux pratiques à faible impact, sont acceptables en termes 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 alimentaire en Haïti. Elles sont 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.

4. 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, 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 représentant 19 % de la surface de la commune et des versants relativement boisés de type mésophiles représentant seulement 14%. Enfin, d'autres recherches devraient prendre en compte les couches plus profondes 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.

**CHAPITRE VI⁶ : LE STATUT ORGANIQUE DES SOLS A SAINT-RAPHAËL :
QUELS MECANISMES, QUELLES PRATIQUES AGRICOLES ET QUELS
INDICATEURS ?**

⁶ Publié : **Weldenson DORVIL**, Hérauld MUSEAU, Donald ANDRÉ, Waselin SALOMON, Jean-Marie THÉODAT. 2024. Le statut organique des sols à Saint-Raphaël : quels mécanismes, quelles pratiques agricoles et quels indicateurs. IJBCS. pp. 2490-2510. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i6.28>.

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

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 ($3,7 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$). Il en est de même pour la concentration en azote totale avoisinant $0,275 \text{ g kg}^{-1}$. Dans la couche 50-100 cm, des faibles teneurs en carbone et en azote estimées respectivement à $1,125 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ et à $0,025 \text{ g kg}^{-1}$ 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 ($196,44 \text{ MgC. ha}^{-1}$) et le système de pâturage ($128,55 \text{ MgC. ha}^{-1}$). Les stocks de carbone organique varient de $80,57 \text{ MgC. ha}^{-1}$ pour les Haplic Cambisols positionnés dans les versants à 203 MgC. ha^{-1} 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.

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 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 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 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.

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

1. 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 CO₂ augmentent considérablement par rapport à la période préindustrielle passant de 277 parties par millions (ppm) en 1750 à 405 ± 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 ; Chenu 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, 2018), le maintien d'une couverture du sol (Chenu et al., 2014 ; Pellerin et al., 2021), l'augmentation de la production primaire (Chevallier et al., 2015 ; Chenu 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 CO₂ 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 ce chapitre 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.

2. Résultats

2.1 Distribution verticale des concentrations en COT et en N total

Les propriétés physiques, à savoir les valeurs de densité apparente et la texture des sols ont été déjà présentées pour la couche 0-50 cm dans le chapitre précédent. Il en est de même du pH du sol variant de 6,8 à 8,3. Le rapport C/N varie de 10 en SI à 12 en SA à 0-30 cm du sol. Dans la couche 50-100 cm la valeur moyenne de D_a est de $1,54 \text{ g cm}^{-3}$. La Figure 41 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 ($3,7 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$) et en N total ($0,275 \text{ g kg}^{-1}$). 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 41b). Notons cependant que la couche 50-100 cm est presque exempte d'azote total.

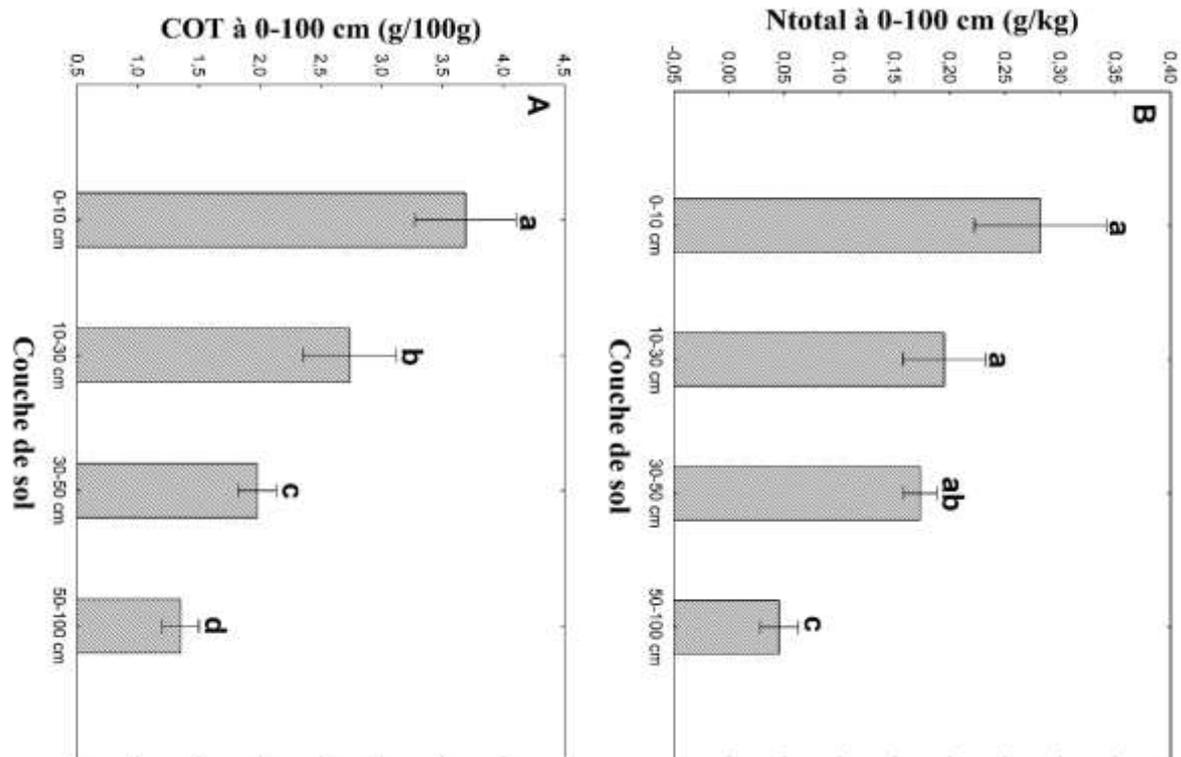


Figure 41 : Distribution verticale des teneurs en carbone et en azote total à 0-100 cm

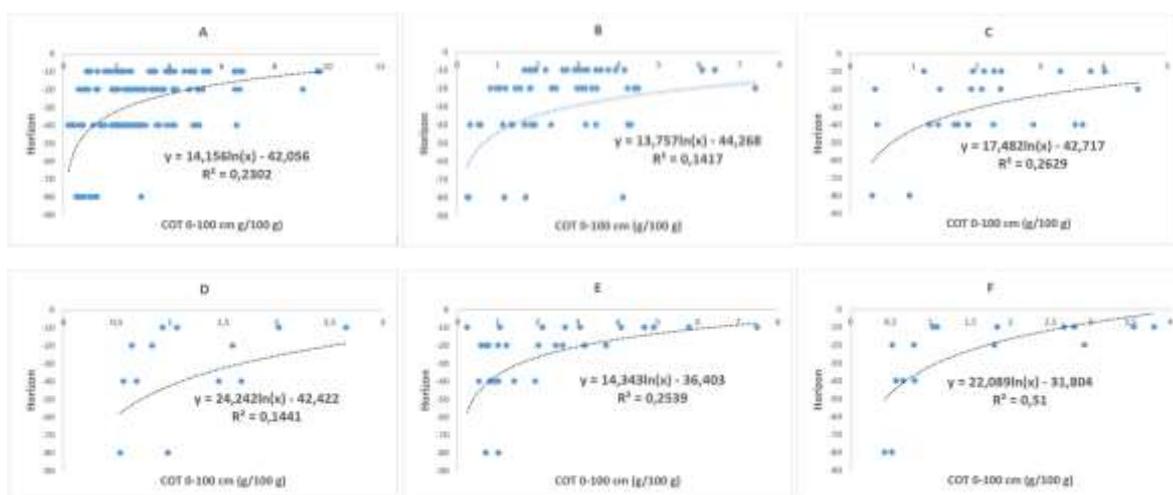


Figure 42 : Distribution verticale des teneurs en carbone en fonction des types de sol. Avec A : RELEC, B : Vertisol, C : Gleysol, D : Leptosol, E : Régosol, F : Haplic-Cambisol. $p = 1\%$.

La Figure 42 présente la distribution verticale des principaux types de sols inventoriés à Saint-Raphaël. Les RELEC (Figure 42a) et les Vertisols (Figure 42b) sont relativement semblables en termes de distribution verticale du C. On observe que leur concentration en C excède 5 g 100 g⁻¹ dans la couche 0-10 cm de certains profils. Toutefois, comme dans tous les sols, de faibles teneurs en COT (< 1 g 100 g⁻¹) 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⁻¹. 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.

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

À 100 cm, la teneur en COT (n = 90) varie respectivement de 2,12 g 100 g⁻¹ en SSU à 2,83 g 100 g⁻¹ en SA (Figure 43a) pour une moyenne de 2,48 g 100 g⁻¹ (Figure 43b). La teneur en N total, estimée dans la couche 0-50 cm, varie de 0,18 g kg⁻¹ en SSU à 0,24 g kg⁻¹ en SA (Figure 43c) suivant une moyenne de 0,22 g kg⁻¹ (Figure 43d). L'effet significatif au seuil de 5% est observé entre les systèmes de culture pour ces deux indicateurs du statut organique des sols.

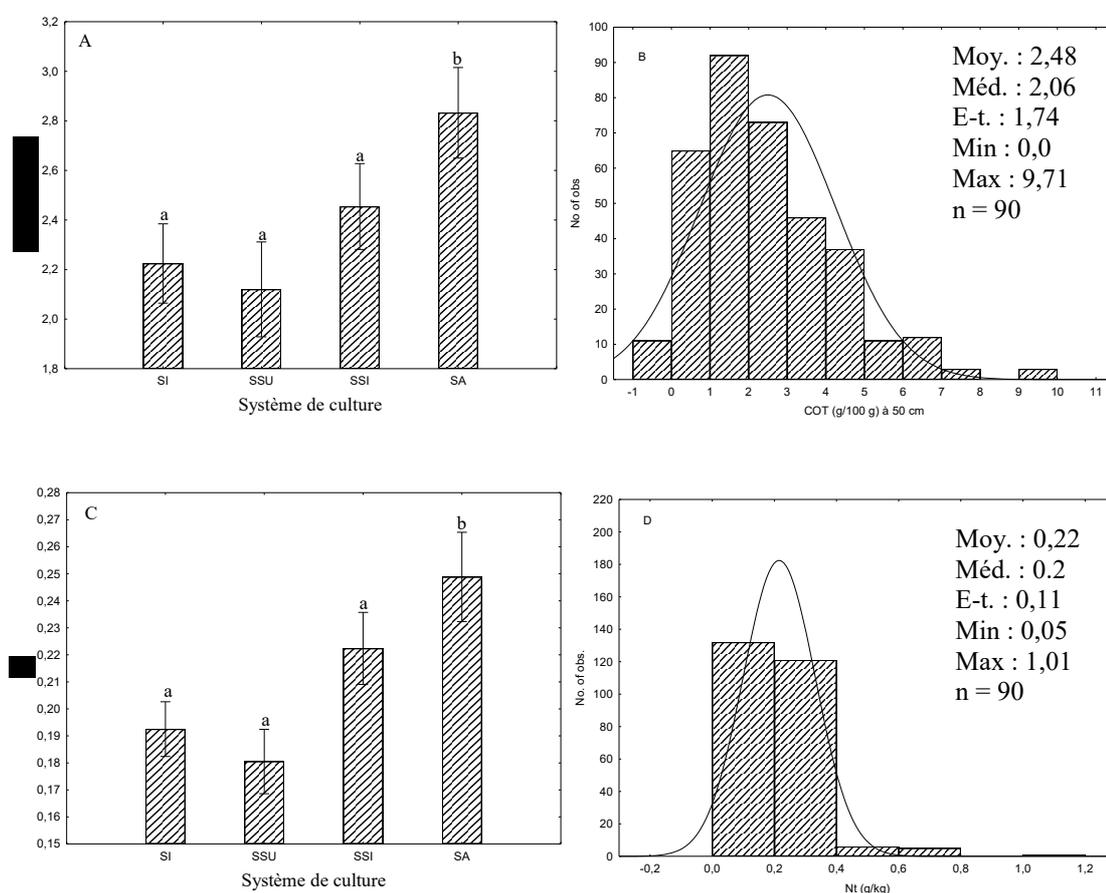


Figure 43 : Histogrammes de distribution (n=90) et statistique descriptive des concentrations en Carbone organique total (0-100 cm) et en azote total (0-50 cm) en fonction des systèmes de cultures.

2.3. Distribution des stocks de carbone et de l'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⁻¹ suivi des Vertisols, 181 MgC. ha⁻¹. Ce sont les seuls types de sols présentant des stocks de COS > 180 MgC. ha⁻¹ (Tableau 39). 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⁻¹ pour les Haplic Cambisols à 0,38 g kg⁻¹ pour les RELEC (Tableau 39). 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 dominent 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⁻¹) et le plus faible stock de COS est enregistré dans les mornes et les versants, 151,3 MgC. ha⁻¹.

Tableau 39 : Statistiques descriptives des stocks de COS (MgC. ha⁻¹) des différents types de sol à 0-100 cm et dans l'horizon C du sol, 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

2.4. Estimation des stocks 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⁻¹ (Figure 46b). Ce stock varie de 128,55 MgC. ha⁻¹ en SSU à 196,44 MgC. ha⁻¹ en SA (Tableau 40). Des différences significatives (p<0,05) sont observées selon la profondeur du sol (Tableau 40) et selon les systèmes de culture (Figure 46a). Le stock moyen pour la couche 50-100 cm est de 42,16 Mg C ha⁻¹.

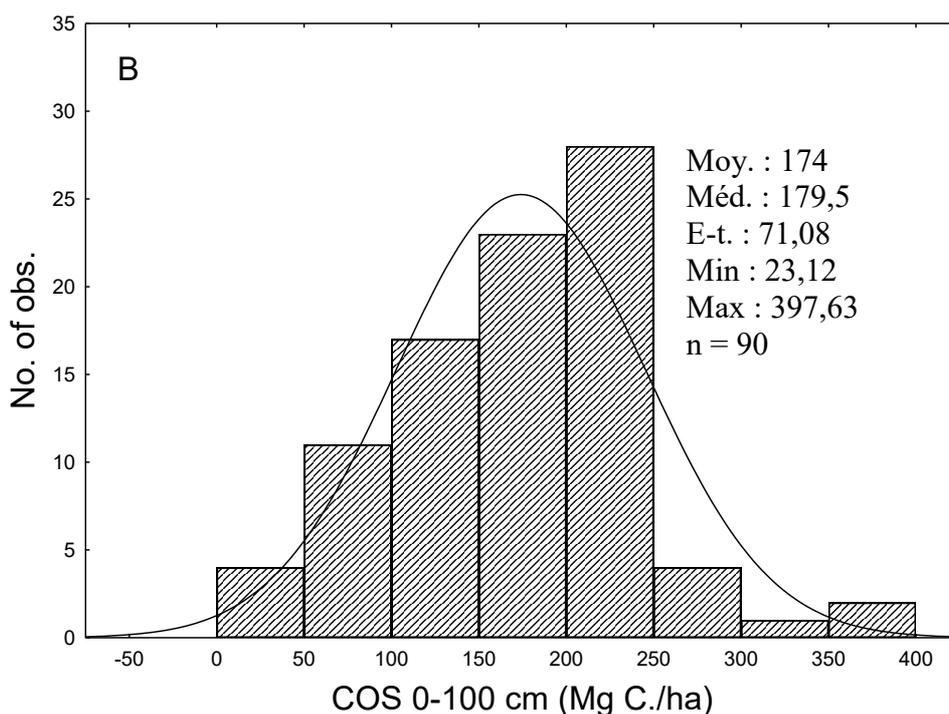
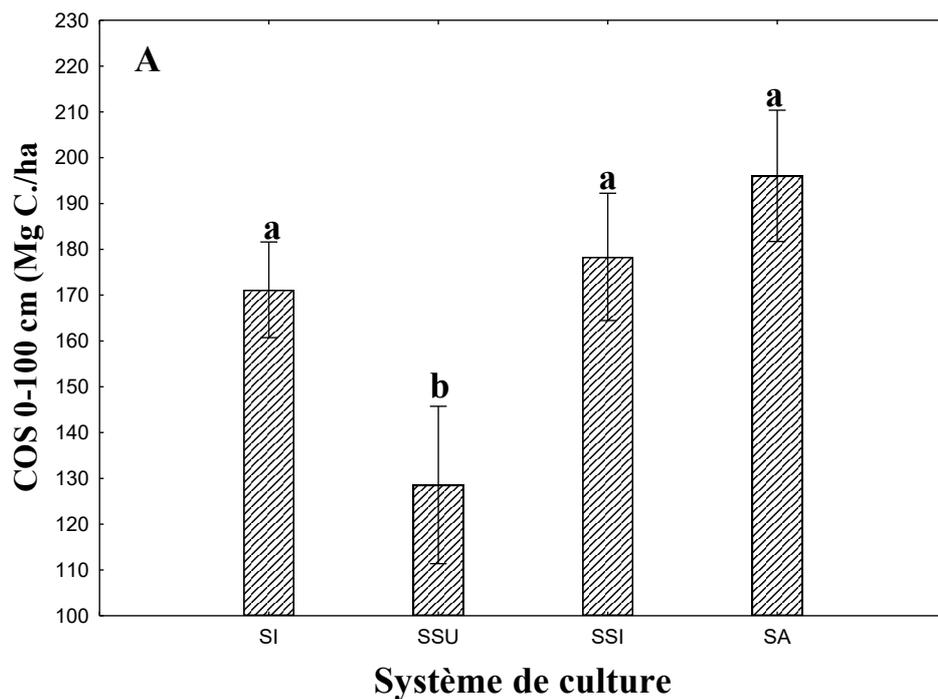


Figure 44 : Histogrammes de distribution des stocks de COS de la couche 0-100 cm en fonction des systèmes de culture (A) et statistique descriptive des stocks de COS (B).

Tableau 40 : Variation des stocks COS (MgC. ha^{-1}) en fonction des systèmes de culture et de la profondeur du sol. Les valeurs suivies d'une même lettre indiquent l'effet non significatif au seuil de 5%. 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.

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

2.5. Distribution spatiale des stocks de carbone organique (COS) à Saint-Raphaël

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 45 ; Tableau 39). 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 à 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 (Chapitre 5), 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 du plateau de Bouyaha.

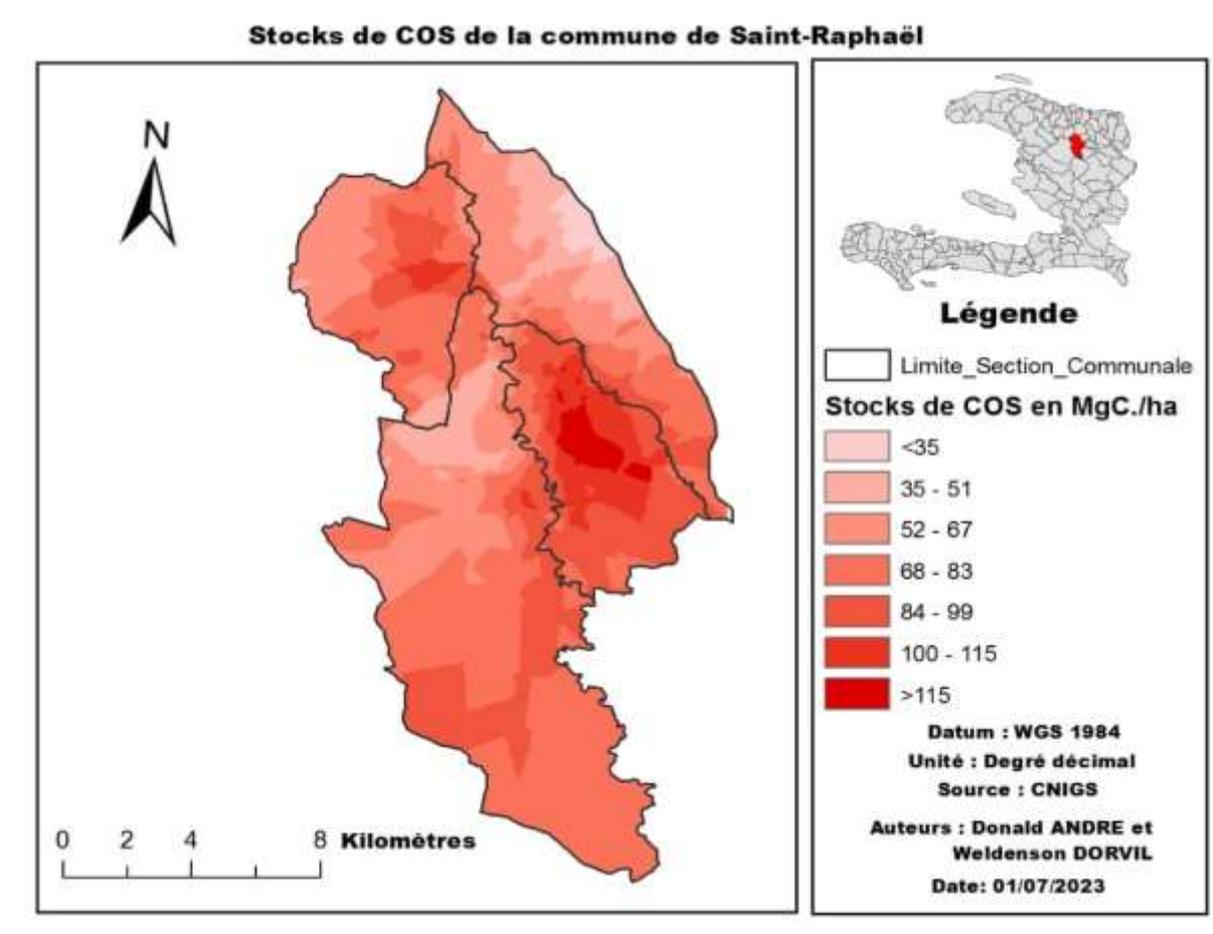


Figure 45 : Spatialisation du stock de COS à 0-50 cm.

2.6. Analyses des liens entre la fertilité et le carbone du sol associant la texture fine du sol

Il convient de rappeler que ce chapitre 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 41), ensuite nous avons établi le lien entre les systèmes de culture et le rapport COT/argile (Figure 46). Ce ratio varie de 47 à 85 milligramme d'argile par gramme de sol 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.

Tableau 41 : 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%.

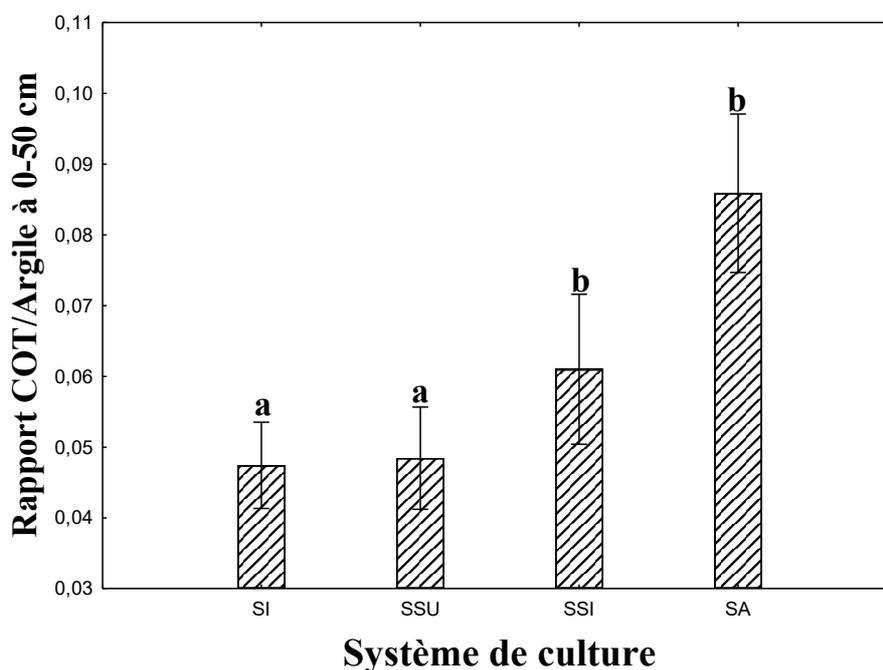


Figure 46 : Influence des systèmes de culture sur le rapport COT/argile à 0-50 cm.

2.7. 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 du sol (Figures 47a 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 :

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

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

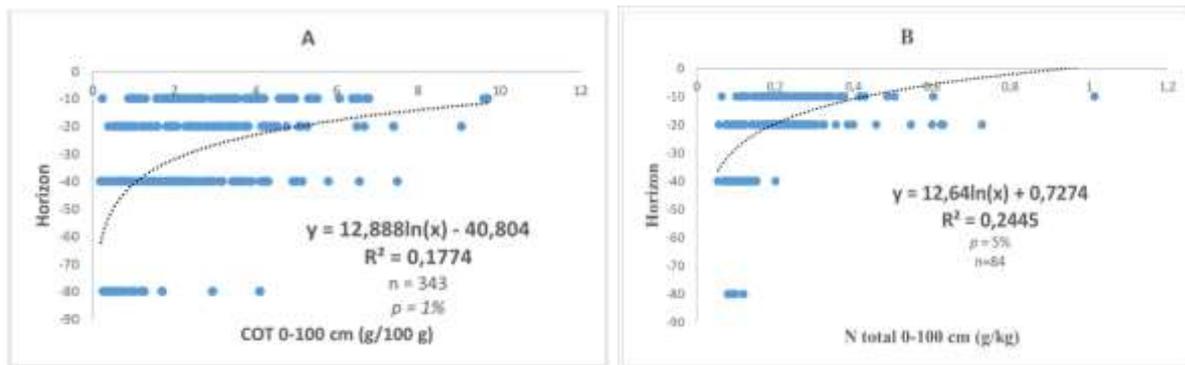


Figure 47 : Courbes logarithmiques relatives à la prédiction de la variabilité verticale des concentrations en carbone (A) et d'azote totale (B).

3. 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 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 traces 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 $113,2 \text{ MgC ha}^{-1}$ pour une moyenne de $52,8 \text{ MgC ha}^{-1}$ et de $17,8$ à 122 MgC ha^{-1} suivant une valeur moyenne de COS de $44,3 \text{ MgC ha}^{-1}$. 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 détaillés dans le chapitre 3 (Figures 27 et 33).

Nous basant sur les systèmes de culture, la plus forte concentration en COS a été repéré 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 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⁻¹. Il en est de même des travaux de Gardi et al. (2014) rapportant un stock de COS de 185 Mg C ha⁻¹.

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 dans le chapitre 5. 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 41). 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. Cela argumente aussi l'hypothèse émise 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 avec 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 Nt 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 récoltes. Contrairement au SI, les différences en N total observées dans le système semi-intensif (SSI) sont quasiment faibles (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 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. La faible teneur en Nt constatée 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 (Feller et al., 2006 ; Dorvil et al., 2023).

Les plus fortes concentrations en N total et en COT constatées au système agroforestier (SA) confèrent au sol une meilleure fertilité par rapport aux autres systèmes cultivés. Associé aux arbres, ce système SA est caractérisé par une forte diversité d'espèce cultivée (jusqu'à 9 espèces cultivées/parcelle/campagne) avec la valorisation des légumineuses : le 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⁻¹ an⁻¹ (Jalonen et al., 2009). En Haïti, une valorisation des légumineuses pérennes comme le *Gliricidia sepium* est requise. Selon Dulormne et al. (2003), cette espèce arborescente peut fournir des apports considérables d'azote pouvant atteindre jusqu'à 400 kgN. ha⁻¹ an⁻¹ 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_4^+ (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_3 peut entraîner l'inhibition de l'activité des nitrobactères et l'accumulation de NO_2 . 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 selon 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 39). 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 et le manque de valorisation des résidus de récoltes (Le Guillou, 2011 ; 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.

4. 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 l'initiative 4 pour 1000 en vue de maintenir les stocks organiques des sols par 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.

DISCUSSION GÉNÉRALE, PERSPECTIVES ET CONCLUSION

Dans les hypothèses, nous avons essayé de retracer de manière approfondie les grandes orientations/réflexions conduites par le Ministère de l'agriculture (MARNDR) en matière d'agriculture en Haïti. Ainsi, notre discussion est basée sur ces mêmes enjeux. Pour y répondre, les questions de recherche dont nous avons traité sont les suivantes :

1. Au-delà de l'évaluation des pratiques, quels systèmes de culture répondant au mieux pour une gestion conservatoire de la fertilité des sols ?
2. Les stocks de COS sont-ils influencés par l'effet des systèmes de culture ? Comment varient les stocks de carbone en fonction des systèmes de culture, des types de sols et de la profondeur du sol ?
3. Existe-t-il du carbone et d'azote dans les horizons profonds des sols et combien y a-t-il de terre fine y compris dans les sols pierreux? Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs pour un meilleur statut organique des sols à Saint-Raphaël ?

Ainsi, nous avons présenté plusieurs catégories de résultats et nous souhaitons une compréhension de la part des lecteurs à travers ces éléments de discussion mis en avant. Donc, on conclut que cela s'inscrit dans les objectifs du MARNDR et, c'est ainsi que nous tenons à structurer notre discussion.

1. Carbone-Fertilité pour les acteurs

Il faut noter que la notion de fertilité associée à l'indicateur C des sols est un concept original et nouveau en Haïti en particulier en milieu paysan. Autrefois, lorsqu'on parlait de la fertilité des sols en Haïti, on se référait surtout à la disponibilité en éléments essentiels dans les sols en particulier l'azote, le phosphore, le potassium, Mg, Ca, etc. Cependant, on ignore qu'un sol peut être « riche » en ses éléments sans pour autant être fertile. Car l'absorption des ions par les plantes cultivées dépend de nombreux facteurs notamment : **i)** de la nature, de la concentration, de la disponibilité et des interactions entre les ions dans le sol ; **ii)** de la nature (présence de colloïdes chargés), de la structure, du pH et de la température du sol ; **iii)** de l'âge et de l'état physiologique de la plante, de l'activité biologique de la rhizosphère, etc. Vu cette complexité, les scientifiques ont simplifié ce paradigme en s'accrochant aussi sur le statut organique des sols (MOS/COS et Nt).

Ainsi le but consiste à montrer à tous les acteurs travaillant dans le secteur agricole en Haïti que le carbone organique du sol est désormais un indicateur central de mesure de la fertilité qu'il faut mettre en avant en Haïti. Nos analyses l'ont bien démontré et corroborent avec les travaux de thèse de Courte (2019).

Nous avons montré une concentration en COT se situant autour de 3,7 g 100 g⁻¹ ou 37 g de C par kg de sol dans la couche à 0-10 cm. Une telle teneur nous interpelle et nous a poussé à tirer cette conclusion : « En admettant qu'on perdrait par érosion 10 tonnes de terre fine par an contenant ces 3,7% de COT, cela signifie qu'on exporte 0,37 tonnes de COT ha⁻¹ an⁻¹ qui étaient emmagasinés dans la couche 0-10 cm. Autrement dit, on exporte plus de 6% (3,7*1,724) de MOS de la couche 0-30 cm qui était emmagasinée dans les 10 premiers centimètres du sol ». D'où la cause des faibles concentrations en MOS constatées dans les sols positionnés dans les versants suite à l'érosion des sols. Et, cette faible teneur est associée à une baisse de fertilité au profit de la vallée et du plateau. En ce sens, les agriculteurs ont dû abandonner ces terres pour aller exercer davantage de fortes pressions sur les terres situées dans le plateau irrigué provoquant le morcellement des terres (Dorvil et al., 2023).

En faibles teneurs, des composés organiques dans l'horizon profond (50-100 cm) ont été repérées de tous les types de sols. Ces faibles teneurs en COT et en N total dans cet horizon se traduisent par la présence d'une plus faible concentration en MOS vivante (racines par exemple) et d'une réduction des activités biologiques dans cet horizon profond. Il en est de même de l'existence de terre fine qui est faible en particulier, dans les sols des versants comme les Régosols, les Leptosols et les Haplic Cambisol.

Nous basant sur la perception des agriculteurs à l'égard de la fertilité, les agriculteurs pensaient que la MOS rend les sols plus productifs et donc plus fertiles (Han et al., 2021 ; Gerke, 2022). Dans nos enquêtes ils ont évoqué la nécessité des apports réguliers de fertilisants et de pesticides pour espérer un bon rendement en SI. Leur perception sur l'état de fertilité des sols était également basée sur la couleur et sur le degré de pierrosité des sols. Ils ont rapporté que plus un sol contient de la MOS, plus il est noir et plus il est fertile. Mais à aucun moment l'intensification des pratiques n'est lieu par eux à une baisse de la MOS et, toute baisse de rendement appelle plus d'engrais pour eux (Chap. 4).

Tenant compte de ces résultats sur la performance économique avancée par les agriculteurs (*ne faisant pas partie directement de nos travaux ici*), nous avons tenté de comparer nos résultats avec ceux issus des travaux de Jules et al. (2023) à Saint-Michel-de-l'Attalaye, commune limitrophe de Saint-Raphaël. Ces auteurs ont rapporté que les agriculteurs valorisant la MOS (compost, résidus de culture) et des structures antiérosives dans les versants ont un revenu moyen mensuel de 34000 Gourdes. La canne-à-sucre grandement cultivée dans les versants contribue aussi à la conservation des sols de cette zone. Les systèmes de culture coexistant sont moins exigeants en termes d'intrants chimiques et de mains d'œuvres. Cependant, à Saint-

Raphaël, les agriculteurs, en exerçant de fortes pressions sur les versants, reposent grandement sur l'usage d'intrants chimiques dans le plateau (7500 Gourdes /sac de 100 lb d'urée). Ainsi, selon nos premiers résultats sur la performance agroécologique à Bouyaha (étude en cours sur 105 EA à Saint-Raphaël), le revenu moyen mensuel pour 35 EA s'élève à 17 000 Gourdes, à cause du coût de la main d'œuvre et des intrants (systèmes de culture maraîchères et saisonnières). Toutefois, ils n'étaient pas au courant et n'ont pas perçu d'effets des légumineuses sur la fertilité des sols.

En Haïti, des essais de plusieurs espèces de légumineuses perennes ont été développés pour améliorer la fertilité des sols voire pour augmenter les stocks de COS et d'azote total. Parmi ces légumineuses de couverture, le *Leucena leucocephala*, le *Gliricidia sepium* ont été testés (Isaac et al. 2000). Par contre la première espèce qui est très envahissante doit être bien gérée. La densité de plantation conseillée est de huit mètres sur la ligne de plantation. Ces auteurs ont indiqué que ces deux espèces de légumineuses peuvent fournir suffisamment d'azote et de la MOS pour la production céréalière à basse altitude en Haïti.

Dans leurs travaux, König (1993) et Ndayizigiye (1994) ont montré qu'un réseau de haies vives de *Leucaena* plantées tous les 8 à 10 mètres a produit 4 à 10 t ha⁻¹ an⁻¹ de MOS dans l'horizon de surface du sol. Selon ces mêmes études, les remontées biologiques atteignent 100 kg ha⁻¹ an⁻¹ d'azote, 10 kg de phosphore et 40 kg de cations échangeables (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺). Reconnues bénéfiques pour la fertilité des sols, Gil et al. (2017) et Badiane et al. (2020) ont indiqué que les associations mixtes céréalière-légumineuses ont des effets positifs sur les agroécosystèmes notamment : la disponibilité des ressources trophiques principales comme l'eau, l'azote minéral et la lumière ; le contrôle des adventices durant l'association et l'interculture ainsi que sur la dynamique de l'azote et du carbone à l'échelle de la succession culturale (Amossé, 2015). Ces pratiques sont prometteuses pour inverser le processus de dégradation des sols et peuvent contribuer de manière significative à la réalisation du double objectif d'augmenter la productivité et d'améliorer la durabilité des systèmes de cultures céréalières (Corre-Hellou et al. 2006 ; Naudin et al. 2010 ; Ali et al., 2014 ; Kumar et al., 2020). Ainsi, pourrions-nous terminer avec les propos d'un agriculteur déclarant : les sols de bonne qualité sont ceux de « couleur noire ayant une bonne couverture végétale et un rendement satisfaisant ». Scientifiquement il fait référence à la disponibilité adéquate en MOS que contient ce sol.

2. C organique du sol à Saint-Raphaël et son implication environnementale

En Haïti, certains concepts proches du COS comme le bilan du carbone sont très peu prononcés aux vocabulaires des décideurs travaillant dans le secteur agricole et forestier. Toutefois, le

changement climatique progresse à un rythme où les mesures d'adaptation et d'atténuation sont encore peu connues voire peu développées. Certaines pratiques effectuées à Saint-Raphaël provoquent la dégradation accélérée des terres et le déstockage du COS. Il s'agit notamment des opérations de défrichage effectuées pour exploiter le bois pour mettre en valeur les terres en pente soumises au pâturage permanent et à la déforestation généralisée. Elles réduisent l'apport de litières à la terre tandis que la vitesse de minéralisation de l'humus du sol n'est guère réduite. Il en est de même des pratiques de brûlis des résidus de récoltes qui sont surtout répétées dans le plateau irrigué à Saint-Raphaël en vue d'une réutilisation de l'agrosystème suivant une interculture courte (Dorvil et al., 2023). Or, ces opérations, considérées comme destructrices de l'environnement, provoquent une baisse rapide de 50% de la MOS humifiée en quatre ans (Roose, 1995). Ce qui a pour conséquences à court terme l'érosion ravinante des terres et à moyen terme la dégradation accélérée des terres. Une fois que les réserves organiques et minérales facilement assimilables sont épuisées dans ces milieux fragiles, il faudra environ 10 à 15 ans ou même plus pour restaurer ces terres. C'est le cas de la première et de la deuxième section de Saint-Raphaël. Les processus de dégradation ont été accélérés à partir des années 1990 suite à l'embargo imposé sur Haïti par le gouvernement américain (CHCL et al., 2020). Je me rappelle quand j'étais en 8^{ème} année fondamentale en 1997, ces versants étaient encore couverts jusqu'à 2004 ; période marquée par des grands bouleversements sociopolitiques dans tout le pays. Ceux-ci ont mis davantage la population rurale dans la famine provoquant des fortes pressions sur l'environnement.

Courte et al. (2020) ont rapporté que les stocks de carbone organique des sols varient rapidement et fortement après la défriche et la mise en culture sous espaces boisés. À Saint-Raphaël, les terres dégradées suite au défrichage subissent des érosions provoquant l'affleurement des versants et l'ensablement des lits des cours d'eau (Figure 17c). Dans ce cas, la couche arable des sols en pente s'amincit progressivement jusqu'à la roche-mère. Pour remédier cette situation, nous suggérons l'adoption de la stratégie d'ingénierie écologique pour une gestion conservatoire des ressources sols et eaux. Ce qui favorisera simultanément la séquestration du C et la restauration des sols.

3. État des stocks organiques à Saint-Raphaël : Bilan

Nos résultats ont montré des stocks de COS élevés dans les sols et semblent corroborer avec ceux de Gardi et al. (2014). Dans leurs travaux intitulés « Atlas des sols d'Amérique latine et des Caraïbes », ils ont indiqué un stock moyen de 185 Mg C. ha⁻¹ dans la couche 0-100 cm. Dans nos travaux, des stocks variant de 129 à 196 MgC. ha⁻¹ ont été obtenus. Ces stocks ont été

expliqués suivant deux grands facteurs : i) la forte teneur en particules fines du sol jouant un rôle de protection physique évoquée par de nombreux auteurs (Feller et Chenu, 2012, Chavallie

el al., 2010 ; Heywood et Turpin, 2013 ; Barré et al. 2020) et **ii**) de la biodiversité végétale liée avec l'abondance des racines (Cardinael et al. 2020 ; Mahdi et al., 2017 ; Xiao et al., 2020). D'ailleurs, nos analyses, établissant le lien entre les systèmes de cultures et le ratio COT/argile, l'ont bien confirmé en montrant la place de l'argile dans la distribution du C à Saint-Raphaël.

Cependant, nous avons montré également une grande variabilité de stocks organiques selon les types de sol, la profondeur et les systèmes de culture. Dans le plateau irrigué où est localisé le système SI, tout se bouscule : il y a du labour, le brûlis, de l'usage excessif d'engrais azoté. Ce qui nous amène à dire que la restitution des cendres et des éléments minéraux de ces cendres n'est pas suffisante en termes de restitution de nutriments au sol pour la culture suivante. Dès lors, on peut se poser la question si les agriculteurs sont obligés d'utiliser les engrais et si les stocks organiques sont suffisants ? Les résultats de stock de C de la couche 0-30 cm nous indiquent qu'il serait possible qu'il existe un problème de pérennité d'éléments minéraux biodisponibles dans le sol. Il convient dans ce cas de se poser la question d'une caractérisation de l'offre alimentaire du sol pour les plantes avec des approches plus appropriées afin de questionner la stabilisation du carbone malgré des valeurs élevées obtenues. Dans l'attente d'analyses (en cours), on a mesuré une matière organique stable sur laquelle il n'y a pas de l'offre alimentaire pour les plantes cultivées et le « seuil de dégradation » serait proche de cette valeur enregistrée en SI.

Nonobstant, comme vu aux chapitres 5 et 6, la variabilité des stocks en profondeur est importante. Ceci milite pour une poursuite de mesures jusqu'à 1 mètre de profondeur. Par ailleurs, il n'est pas actuellement aisé de trouver des parcelles pour faire des évaluations temporelles, $COS = f(t)$ par système. Et, il est encore difficile de comparer avec précision des parcelles sous différents modes de gestion. En d'autres termes, cette étude apporte des éléments clés pour l'atténuation mais doit se poursuivre pour apporter des éléments rigoureux pour l'adaptation au changement climatique.

La Figure 48 présente une illustration des quatre scénarios relatifs à la dynamique verticale des stocks de COS et schématise l'effet des différents systèmes de culture sur la distribution verticale du COS. Ces résultats montrent qu'il y a peu de différence jusqu'à 50 cm du sol et qu'il a fallu considérer le stock jusqu'à cette profondeur pour voir émerger le SA. Ce qui peut se traduire par un système d'enracinement plus profond en SA. Cette différence peut aussi s'expliquer par des restitutions organiques qui ne sont pas perceptibles dans les autres systèmes.

Stocks verticaux de COS (MgC ha ⁻¹)				
	Système intensif	S. semi-intensif	S. pâturage	S. Agroforestier
				
0-30 cm	87,54 a	93,92 a	87,43 a	113,3 a
0-50 cm	121 a	132 a	111 a	155 b
0-100 cm	171 a	178 a	129 b	196 a

Figure 48 : La répartition verticale sous forme de schémas de l'évolution des stocks de COS pour les différents systèmes de culture.

4. Influence des systèmes de production agricoles sur les propriétés du sol à Saint Raphaël

4.1. Cas des systèmes de production à usage intensif (à impacts forts)

Nous avons identifié (chapitre 4) un système de culture caractérisé par : le travail intensif du sol, les pratiques de brûlis des résidus de culture, l'usage intensif d'intrants chimiques et la monoculture. Il est de même d'un système de pâturage permanent caractérisé par l'extraction des bois. Ces systèmes ont été attribués aux systèmes de production à impacts forts. Ainsi, parmi les différentes pratiques agricoles développées, le travail du sol a attiré notre attention où jusqu'à quatre labours sont effectués par an (Dorvil et al. 2023). Les résultats sur les stocks de COS et sur la concentration en azote total ont présenté une tendance à la baisse. D'après les dires des auteurs, il a été prouvé que les opérations intensives de travail du sol conventionnel jouent un rôle prépondérant dans la modification des propriétés physico-chimiques des sols, en particulier sur la structure des sols. Or, selon Alam et al. (2014), lorsque les propriétés physiques du sol se dégradent, cela affecte indubitablement l'utilisation des ressources du sol. Comme conséquence, la fraction labile du COS s'épuise rapidement de la couche arable (FAO, 2018). En effet, ces pertes de C affectent la qualité et la santé du sol suite à la destruction de la biomasse microbienne (Brookes, 2001).

Dans une parcelle d'essai expérimental de longue durée développé en Guyane française, Courte et al. (2019) ont suggéré, à 50 cm de profondeur du sol, des stocks de COS allant de 82,77 à 100,05 tC ha⁻¹ dans des agrosystèmes soumis en cultures pures sur 20 ans. La première mesure de stock correspondant à la valeur de stock la plus faible était issue d'une parcelle de cultures

maraichères monospécifiques sans rotation. La seconde mesure était issue d'une autre parcelle soumise également aux pratiques intensives mais, à la seule différence, cette parcelle a été reprise après une jachère de deux ans. Dans un autre essai développé par Fujisaki et al. (2014) sur les cultures céréalières conduites aussi en pur, ils ont indiqué un stock de 70,5 tC ha⁻¹ après cinq ans de travail consécutif. Les résultats obtenus dans nos travaux à Saint-Raphaël dans le système intensif (121 MgC ha⁻¹) dépassent ceux indiqués par ces deux travaux. Cette forte concentration de COS obtenue dans le périmètre irrigué pourrait être expliquée selon les raisons suivantes : **i)** une incorporation progressive des fractions de la MOS est relativement effectuée dans les sols soumis à ce système de production. Bien que les cultures maraichères et du riz soient soumises aux mêmes itinéraires techniques par les agriculteurs dans cet agrosystème (mêmes besoins édaphiques, en eau d'irrigation, en pesticides et en engrais (chapitre 4), le mélange de plusieurs cultures maraichères (Gombo, poireau, épinard, carotte, tomate, betteraves, etc.) suivi du riz (seule culture pure) facilite, bien que minime, cette incorporation ; **ii)** la nature du sol dans le périmètre irrigué qui a été déjà évoquée, d'ailleurs l'hydromorphie conserve la MOS ; **iii)** les courtes périodes d'intercultures observées en SI sont grandement valorisées par le pâturage bovin, contribuant également à l'incorporation de la MOS dans le sol (Figure 49). **IV)** en l'absence de relation avec les particules fines du sol, notre étude a souligné l'importance des carbonates de calcium dans la stabilisation des matières organiques à Saint-Raphaël (Garcia-Franco et al., 2021 ; Zamanian et al., 2021). Nous avons montré que le CIT servait de puits de COS temporaire tant que les ions bicarbonates restent en solution. C'est le cas du plateau et de la vallée présentant respectivement des teneurs de CIT de 3,71 et de 4,15 g 100g⁻¹. Cette forte teneur en CIT aurait assuré l'effet tampon de ces sols et la stabilité de la MOS (Monger et al., 2015). En revanche, dans les versants, le CIT (2,6 g 100g⁻¹) serait transformé en un pool de C irrécupérable qui se minéralise sous forme de CO₂. Dans ce cas les ions Ca²⁺ sont transportés sous l'effet de l'érosion. En conséquence, toutes les fonctions importantes du CIT sont perdues en cas d'épuisement en accélérant la dégradation de ces sols et la perte de réserves de carbone organique irrécupérables à l'échelle de la génération.



Figure 49 : Vue de la situation controversée du secteur agricole à Saint-Raphaël : a) pâturage bovin observé durant les courtes périodes d'interculture de 30 à 45 jours et b) Pratiques de brûlis généralisées des résidus de culture sur le périmètre après récolte.

4.2. Cas des pratiques durables (à faibles impacts) : agroforesterie, cultures intercalaires, rotation des cultures, jachères et agro-écologie.

Haïti, pays essentiellement agricole mais très montagneux (+ de 63% de surfaces avec des pentes > 20%), est constituée, malgré tous les problèmes susmentionnés, d'un éventail de pratiques agricoles répondant aux critères de durabilité. À noter que le secteur agricole haïtien évolue à petite échelle. En effet, seuls les versants d'Haïti sont quasiment dégradés à l'exception de ceux de la péninsule du Sud et d'une importante superficie du grand Nord d'Haïti (Borgne, Plaisance et Pilate, Accul du nord jusqu'à la Grande Rivière du Nord en passant par Trou du Nord et Sainte Suzanne à Vallières).

De nos jours, des systèmes de production comme l'agroforesterie valorisant la diversification des cultures et plus particulièrement, les cultures intercalaires qui sont surtout développées dans les zones de plateau et de plaine. Ces unités agroécologiques sont constituées d'une couverture arborée dans la majorité des cas dense à très dense. Prenons l'exemple de la culture intercalaire qui est définie comme un processus qui permet de cultiver en même temps au moins deux cultures sur une même parcelle donnée (Finley et Ryan, 2018). Pratiqué à petite échelle (1,5 ha au maximum), ce système de production est considéré comme un grenier, ont rapporté les agriculteurs (Chapitre 4). Ainsi, l'insertion des arbres dans les cultures via l'agroforesterie ou le reboisement des zones déboisées peut contribuer à atténuer le changement climatique en permettant de capturer du CO₂ par la photosynthèse et de le piéger dans le sol. Ce piégeage est facilité via la litière et les exsudats excrétés par les racines, suffisamment longtemps pour réduire l'effet de serre de manière durable (Bernoux et Chevallier, 2013 ; ADEME, 2015).

À Saint-Raphaël, le SA facilite au mieux l'incorporation de la MOS en raison de l'importance de la diversification des cultures, des pratiques de rotations culturales et la valorisation accrue des légumineuses. Nos résultats ont montré que le maintien de la biomasse du sol et de la couche arable est également moins perturbé dans ce système (Dorvil et al., 2003). Aussi on peut donc avancer que l'oxydation de la MOS aurait diminué et cette baisse de l'oxydation entraînerait une accumulation accrue de la MOS soumis en SA comme le stipulent Ghosh et al. (2017), Dignac et al. (2017), Fujisaki et al. (2018), Sagar et Singh (2020), Courte al. (2020) et Pellerin et al. (2021). Globalement, ce système de production agricole est caractérisé par sa capacité à couvrir les agrosystèmes en minimisant l'érosion et la dégradation des terres et en enrichissant la biodiversité (Scherr et Mcneely, 2008).

5. Implication du COS en termes de politiques publiques en Haïti (atténuation et adaptation au Changement climatique en Haïti)

À Saint-Raphaël, les enjeux liés aux changements d'usage des terres sont donc prépondérants dans un contexte d'exploitation de bois pour la fabrication de charbon et pour la construction. Abandonnée par l'État haïtien, la population perçoit ces activités comme des activités génératrices de revenu sans pour autant en tenir compte des conséquences à moyen et à long terme (déstockage de COS). Nous avons assisté à un grand changement d'usage des terres. Ces changements sont surtout d'ordre socio-économique. La démographie élevée associée aux mauvaises pratiques culturales accentue la pression foncière. Les terres situées à plus de 80% de pente sont exploitées (Smolikowski, 1993). Les projets de conservation des sols mis en œuvre dans la zone n'ont donné que des résultats mitigés et semblent le plus souvent n'avoir eu

qu'une efficacité limitée. Certains agriculteurs ont adopté des stratégies traditionnelles de lutte anti-érosive et d'amélioration de la fertilité des sols leur permettant de survivre comme l'érection des rampes vivantes faites avec les résidus de culture, des murs secs sans tenir compte des courbes de niveau. Au niveau du plateau, le développement agricole dans les plateaux irrigués caractérisé par l'usage accru d'intrants chimiques est préoccupant (Dorvil et al., 2023).

De nos jours, près de 1000 ha de terres soumises au pâturage permanent et caractérisées par une végétation naturelle xérophile sont réservées à Saint-Raphaël. Selon les agriculteurs les plus âgés, la majeure partie des versants était boisée en 1995. Ces terres, suite au défrichage pour l'exploitation de bois, sont mises en culture à répétition sans une structure antiérosive préalable. Près de 5 000 ha devraient être concernés par ces changements d'usage provoquant la dégradation accrue des terres et du coup du stock de COS. De cette superficie, près de 10% sont totalement affleurés et 50% de ces terres devraient être concernées en 2050 si aucune mesure de gestion conservatoire n'est mise sur pied par les décideurs. Ces terres positionnées dans les versants à plus de 40% de pente devraient avoir comme vocation de préserver des ressources biologiques et du carbone du sol. Ainsi, nous comprenons bien les enjeux importants qui gravitent autour des questions de la gestion conservatoire des sols en Haïti compte tenu que ces changements qui s'opèrent à des pas de temps très courts mais avec des effets à moyens et longs termes. Il était donc essentiel de questionner les systèmes agricoles en place et leurs effets sur le devenir des stocks après leur développement.

6. Alternatives techniques de gestion des stocks de COS et d'azote total dans les sols à Saint-Raphaël : Tendances futures

Pour gérer au mieux la MOS, plusieurs technologies peuvent être envisagées comme le compostage (très connu en Haïti bien que quasiment non valorisé et/ou vulgarisé à Saint-Raphaël), le pâturage d'animaux par la valorisation des résidus de culture, l'enfouissement des résidus de culture (pratiques opposées au brûlis), les légumineuses tropicales de couverture (*Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Robinia pseudoacacia*...), ainsi que le paillage du sol très efficace dans la lutte antiérosive. Parlant de ce dernier, la majorité des études ont clairement souligné que les paillis organiques influencent directement l'activité microbienne du sol, la température et, par conséquent, le stockage du COS (Ramakrishnaa et al., 2006 ; Jodaugiene et al., 2010). Dans une expérience réalisée par Bajoriene en 2013 sur différentes épaisseurs de paillage sur la teneur en carbone organique du sol (10 cm d'épaisseur au moins), son étude a révélé un stock de COS significativement plus élevé sous tous les traitements de paillis.

À Saint-Raphaël, plusieurs systèmes de culture associés intégrant les légumineuses existent : Pois-congo-Maïs-gombo-pois inconnu ; Haricot-Maïs-Banane ; Haricot-Maïs ; cultures maraîchères-pois-congo. Cependant, dans ce dernier développé dans le périmètre irrigué, nous avons découvert une variété de pois-congo non photopériodique de cycle court (3 mois) dénommée « Ti Bòkò » (*Cajanus cajan* Var *Ti Bòkò*). En raison de la rareté des variétés locales photopériodiques bisannuelles, cette variété fut introduite par un agriculteur, de par sa curiosité en provenance de la République voisine en 2018. Malgré un rendement utile jugé satisfaisant par des agriculteurs, elle exige des intrants chimiques (engrais et pesticides) sans lesquels la prolifération des insectes et des maladies est de grande ampleur. Ainsi, nous estimons que sa vulgarisation a des conséquences néfastes sur les réseaux trophiques en raison du faible développement racinaire nécessaire à la multiplication des nodules pour la fixation d'azote de l'air, de son indice foliaire faible (Figure 51), de ses exigences en eau durant tout son cycle et en pesticides lors de la phase de montaison.



Figure 50 : Vue de deux couverts de pois-congo à Saint-Raphaël : a) variété *Ti Bòkò* non-photopériodique en système intensif en phase de montaison (60 cm de hauteur) ; b) variété locale photopériodique en phase de croissance végétative (1,20 m). Le pois-congo local était associé avec du maïs, du haricot, du pois boucoussou et de la banane qui est toujours présente, la période de montaison est prévue en novembre. La première aurait tendance à épuiser le sol ; la variété locale fournit au contraire des engrais verts, de la biomasse et une meilleure prolifération des bactéries fixatrices d'azote vu le développement accéléré des racines. La figure a) nous montre la nécessité de bien valoriser les légumineuses en particulier la variété de pois-congo photopériodique dans les agrosystèmes.

Sur ce, nous proposons de développer des itinéraires agro-écologiques performants en valorisant également des légumineuses pérennes, qu'elles soient alimentaires ou fourragères,

permettant une réduction des coûts de production (travail du sol, fertilisation et pesticides). Car ce système de production est un moyen d'améliorer la qualité des graines et sa concentration en protéines (9,8%) par rapport à la culture pure traditionnelle (Joshi, 1998 ; Knudsen et al. 2004; Gooding et al. 2007; Naudin et coll. 2010).

Toutefois, la gestion de la masse du sol ne suffit pas. Outre les apports de MOS, il faut également apporter des nutriments aux sols cultivés, mais en cas de besoins. Roose (1995) a rapporté que la gestion des nutriments pour la nutrition végétale en vue de corriger la carence des sols en nutriments est très problématique en milieu tropical car les sols tropicaux stockent bien les nutriments mais la biodisponibilité du phosphore est réduite. Celestin et al. (2019) l'ont bien confirmé dans les sols calcaires d'Haïti. Ces nutriments sont exposés aux nombreux risques : la rétention des ions phosphates par les carbonates et les oxyhydroxides, pertes des particules inorganiques solubles par le ruissellement et le drainage. Pour remédier la situation, nous suggérons de nourrir les cultures par petites doses à proximité des racines des plantes cultivées selon leur besoin dans les différents stades critiques des cultures comme la montaison, la floraison et la fructification.

Ainsi, nous préconisons également un usage plus rationnel en intrants chimiques par une meilleure pratique de la diversification végétale et la valorisation du compost au niveau du périmètre irrigué. Selon Schiettecatte et al. (2022), le compost contient 2% ($0,2 \text{ g kg}^{-1}$) d'azote et peut aller jusqu'à 14% ($1,4 \text{ g kg}^{-1}$, *une dose inexistante à saint-Raphaël*) s'il s'agit d'un compost fabriqué à base de légumineuses. Nous suggérons de développer ces pratiques suivant une approche participative sans laquelle un faible degré d'intégration des acteurs peut être considéré comme un mécanisme de verrouillage. Dans les zones de plateau non irriguées, nous suggérons l'adoption de l'agroforesterie intra parcellaire et l'installation de haies priorisant les légumineuses pérennes. Ces pratiques pourraient contribuer significativement à l'évitement de la déshydratation des plantes cultivées, la résilience des couverts (Litrice et al. 2016) et le maintien de la stabilité des macro-agrégats des sols grâce à l'action des racines et par l'activité biologique qu'elles stimulent. Enfin, nous préconisons la valorisation de la MOS par la promotion des pratiques durables en lien avec les décideurs publics et privés.

7. Autres perspectives

À l'issue de ce présent travail, notre première perspective, dans une optique de promouvoir la MOS, consistera à développer des recherches portées sur la santé des sols jugés crucial sur tout le territoire Haïtien. Cela débouchera sans doute au changement du paradigme de l'exploitation des sols à la régénération des sols par l'agroécologie et les pratiques de gestion durable des

terres. Cela impliquera les producteurs et les entreprises le long des chaînes de valeur. Une première est en cours à Saint-Raphaël et à la ferme du CHCL via l'usage de l'Outil BIOFUNCTOOL développé par CIRAD et l'IRD. Une fois développé, cet outil sera accessible pour tous les acteurs et contribuera à la gestion durable des terres en Haïti.

Pour ce faire, il faudra :

- convaincre les décideurs politiques haïtiens d'augmenter les engagements et les investissements en faveur de la qualité et la santé des sols et de la séquestration du carbone.
- Plaider, via la formation, la sensibilisation et la recherche, pour la santé et la qualité des sols sur le territoire haïtien et l'importance des sols pour le climat et la sécurité alimentaire et sensibiliser le public au rôle central du stockage de COS ;
- promouvoir des leviers pour rehausser la résilience des agroécosystèmes en documentant les effets des traits racinaires sur le fonctionnement et la résilience des agroécosystèmes, leur rôle dans le fonctionnement et la résilience des agroécosystèmes.

Des recherches sur la mesure de la fraction granulométrique sont requises. Il en est de même des mesures de carbone labile des sols qui permettront de mieux prédire l'état de fertilité des sols à Saint-Raphaël.

Vu le manque de données sur les stocks de carbone organique et le potentiel de stockage dans toutes les utilisations des terres en Haïti (les forêts comprises), il faudra mettre en place des initiatives concrètes pour développer davantage des recherches sur la quantification du carbone qui n'existaient pas avant cette première venant tout juste de réaliser à Saint-Raphaël suivants ces axes bien précis :

- protéger les environnements riches en C (forêts, agroforêts, les versants boisés) ;
- développement des meilleures pratiques : adoption au niveau des exploitations et des territoires ;
- émergence d'environnements favorables à la séquestration du C terrestre ;
- Sensibilisations, formations et vulgarisations des pratiques séquestrantes de C, sur les grandes fonctions des sols et services écosystémiques associés ;
- Surveillance, suivi et vérification par les décideurs (MARNDP, MDE, ONGs, OCBs et Universités) ;
- usage d'engrais organiques à l'échelle nationale ;
- prises de décisions en tenant compte des priorités par les décideurs (MARNDP, MDE et Universités) ;

- collaborations avec le monde universitaire, le gouvernement, l'industrie et partage des ressources ;
- capacité scientifique ;
- communications soutenues entre les scientifiques et les non-scientifiques ;
- engagement des parties prenantes ;
- valorisation des plantes à racines profondes comme les légumineuses pérennes ;
- inclusion des légumineuses dans les rotations (les terres les plus travaillées comme les périmètres irrigués sont concernées) ;
- gestion des pâturages
- agriculture de conservation pour promouvoir davantage l'incorporation de la MOS.
- kits d'analyse de sol accessibles, abordables, expédiés aux agriculteurs ;
- explorer les microorganismes pour l'incorporation et la séquestration du C.
- les initiatives économiques peuvent créer de confiance dans les interventions, toutefois, on n'a pas besoin de plusieurs millions pour donner des résultats probants.
- ENFIN, SANS NOUS BASER SUR L'AMELIORATION DES CONDITIONS SOCIOÉCONOMIQUES DES PAYSANS VIVANT SURTOUT DANS LES AIRES PROTEGEES, CES CHANGEMENTS TANT ATTENDUS VIA SES RECOMMANDATIONS NE SERONT JAMAIS POSSIBLES, CAR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT DOIT D'ABORD PASSER PAR L'AMELIORATION DES CONDITIONS SOCIOECONOMIQUES DES HOMMES ET FEMMES, en d'autres termes, par le bien-être humain qui par la suite procurera sans doute le bien être environnemental.

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse doctorale était d'analyser les stocks de carbone des sols de la commune de Saint-Raphaël selon les systèmes de cultures, de leur distribution dans l'épaisseur du sol, selon les types de sols et leur position dans le paysage. Il était aussi question d'établir de liens entre le stockage du carbone organique des sols (COS) et la production agricole durable.

L'inventaire agraire était nécessaire pour identifier le ou les systèmes de culture susceptibles de promouvoir une bonne gestion des sols qui peuvent aider à atténuer le changement climatique après nos mesures de stocks. La stratégie d'étude était celle basée sur l'adaptation au changement climatique où nos mesures de stocks étaient effectuées en fonction de l'évolution des systèmes de culture à Saint-Raphaël donc, des pratiques agricoles.

Les stocks de carbone, estimés à masse de sol équivalente par couche de sol prélevée, ont été quantifiés jusqu'à un mètre de profondeur. Nos analyses ont montré une forte concentration en carbonates associée à une forte concentration en carbone organique dans les 30 et 50 cm du sol. Les stocks de carbone organique mesurés dans les couches 0-30 cm, 0-50 cm et 0-100 cm du sol sont élevés et étaient respectivement de $97,5 \pm 45,7 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$, de $132,7 \pm 60,1 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ et de $174 \pm 71,08 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$. Toutefois, nous avons montré que ces stocks de carbone appartenaient à une matière organique stabilisée, dans laquelle il n'y a pas une offre alimentaire minérale importante pour les plantes cultivées. Nous avons proposé un seuil de dégradation du stock organique des sols qui serait proche 87 Mg C ha^{-1} . Ce seuil est tout à fait intéressant et paraît très élevé par rapport aux stocks observés dans la ceinture intertropicale, mais les conditions agropédoclimatiques ne doivent pas être uniformisées, et il a le mérite de poser des questions de nouvelles recherches sur la nature des compartiments du carbone de ces sols.

Nous pouvons donc avancer que des acteurs académiques et non académiques haïtiens disposent désormais d'un premier référentiel en matière de stocks de carbone organique dans les sols carbonatés. En tout cas pour les sols cultivés. Nonobstant, la recherche de référentiels non cultivés, forêts conservées peu exploitées, reste à faire. Dans l'attente, il convient de voir les situations sous agroforesterie comme des objectifs atteignables en termes de stockage de matière organique dans ces sols (MOS).

Nos analyses impliquent que l'approvisionnement en MOS endogène et exogène rend les agrosystèmes moins vulnérables à la dégradation physique, chimique et biologique. Ainsi, les sols positionnés dans les versants ont enregistré les plus faibles niveaux de stocks de COS variant de $38,3 \pm 16,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$ pour les Haplic Cambisols à $59,01 \pm 59 \text{ Mg C ha}^{-1}$ pour les

Régosols. Ces faibles valeurs sont principalement dues aux faibles restitutions des composés organiques d'origine végétale, litières et exsudats racinaires. Ces sols, soumis à l'érosion hydrique, font également face à des dégradations de nature physico-chimique et biologique.

Nous avons constaté une plus forte concentration en C et en Nt dans le système agroforestier qui est majoritairement rencontré dans la vallée. Cette incorporation de la MOS n'est que le résultat d'une meilleure couverture végétale à long terme, d'une augmentation des inputs de carbone par les arbres via la production primaire et d'une meilleure colonisation racinaire dans les 50 premiers centimètres du sol. Une grande variabilité de stocks de carbone a été également constatée au niveau de la profondeur du sol dans tous les systèmes inventoriés.

Dans le système agroforestier, la macrofaune du sol, en particulier les vers de terre observés semblent agir comme catalyseur de la formation d'agrégats en quantités plus élevées. Car ils sont considérés comme l'un des indicateurs biologiques liés à la formation des agrégats du sol. Dans le chapitre 3, nous avons montré que l'épaisseur organo-minérale des sols sous l'agroforesterie serait due à l'abondance des vers de terre associée à de fortes restitutions racinaires.

Nous basant sur la perception des agriculteurs, l'agroforesterie a été perçue comme une alternative aux intrants chimiques. Bien qu'ils ne soient pas au courant et n'aient pas perçu d'effets des légumineuses sur la fertilité des sols voire au stockage de CO₂, ils ont bien affirmé que la qualité d'un sol dépend de son degré de pierrosité, de la pénibilité du travail du sol et de la profondeur utile, de la proportion d'arbres dans la parcelle et de sa productivité. Notre inventaire pédologique l'a bien affirmé dans le système agroforestier et en particulier dans les Rendzic Leptosols et Epileptic Cambisols. Une affirmation ayant été également prouvée par nos analyses statistiques. Nous n'ignorons pas la vulnérabilité des agriculteurs qui est façonnée par le contexte socioéconomique, politique et biophysique. Le manque d'encadrement technique pèse fort dans la balance.

L'ensemble de ces premiers résultats appelle quelques recommandations développées ici, et nous proposons en annexe un document diffusable destiné aux politiques publiques.

Quelques recommandations succinctes

En vue de retracer de manière approfondie les grandes orientations conduites par le Ministère de l'agriculture (MARNDR), nous avons jugé la nécessité de soumettre une liste de recommandations auprès des acteurs (cf Discussion générale). Il s'agira ici de faire un récapitulatif d'une liste d'actions pertinentes pour l'amélioration des sols via des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement et donc plus durables et plus rentables. Ce qui contribuera grandement à l'amélioration de la sécurité alimentaire de la population locale et la régulation du climat local.

➤ Cas des versants :

Comme constaté dans nos travaux, les sols positionnés dans les versants à Saint-Raphaël sont pauvres en MOS. Ils sont donc plus exposés à la dégradation en raison d'une part, des pratiques inappropriées et, d'autre part, par le manque d'encadrement technique des agriculteurs. Nous avons bien montré le cercle vicieux de la dégradation des sols (Chap. 1). Ainsi, nous proposons de :

- restaurer ces sols par la construction des ouvrages d'ingénierie écologique dans les ravines (lits majeurs) et les versants. Toutefois, pour les berges des cours d'eau, la question de l'agressivité des séquences pluviométriques reste posée pour leur réalisation et leur pérennité. Une telle stratégie reposant sur le développement du couvert végétal permettrait dans un premier temps l'atténuation de l'érosion des versants et la rétention des sédiments dans les lits des ravines mais également une augmentation de la stabilité des sols.
- valoriser les légumineuses pérennes : comme évoqué précédemment, le développement de ce couvert végétal ne devra donc pas se faire sans se baser sur un choix logique des légumineuses pérennes caractérisées par un système racinaire profond. Ce qui contribuera grandement à moyen et à long terme à l'amélioration de la structuration du sol, la stabilité des agrégats et la dynamique du carbone. L'infiltration de l'eau dans ces sols serait facilitée et la disponibilité de l'eau de surface en serait également possible.

➤ Cas du plateau irrigué :

Dans cette unité agro-écologique, la plus grande ambiguïté constatée peut être expliquée par l'interculture courte de 45 jours au plus associée à l'intensification agricole (brûlis, travail répété du sol, labour profond, non-pratique ou très peu de diversification culturelle, usage intensif d'intrants chimiques, faible rotation culturelle, etc.). Toutefois, une valorisation des légumineuses dans les rotations culturelles atténuerait ces processus

néfastes : la compression (*diminution du volume de pore...*) et le cisaillement du sol (*discontinuité des pores le long de l'horizon du sol*), moteurs de la compaction des sols. Ils sont considérés comme des freins majeurs et/ou des obstacles empêchant l'infiltration de l'eau dans ces sols très compacts (Merlaine jusqu'à la porte 10 sont surtout concernées). Dans ce cas, la fertilité physique, chimique et biologique de ces sols serait améliorée.

Comme évoqué précédemment, les 2650 hectares de terres irriguées sont exploitées par 14 000 exploitants (soit 0,2 ha par producteur). Donc, on assiste au morcellement de terres associé à l'accroissement de la population voire, à une diminution de la surface en sols cultivés. Outre cela, ces terres sont majoritairement en mode de faire valoir indirect (fermage, métayage). Pour restaurer ces terres, la « transparence » vis-à-vis des acteurs devra être au centre des décisions. Nous recommandons l'installation des lignes végétales sous forme de haies conçues à base des légumineuses pérennes le long des parcelles paysannes. D'ailleurs, l'avantage qu'il convient de mentionner est que les parcelles positionnées dans cette unité ne soient pas clôturées. A l'échelle parcellaire, on peut procéder à l'implantation d'une clôture vivante avec des espèces arborées en priorisant les légumineuses pérennes : Gliricidia, Leucena et Pois doux ou Sucrin (*Inga verra*, adapté pour les lits des cours d'eau). La Leucena mérite une attention particulière car elle peut être envahissante en peuplement ouvert, elle se conduit comme une plante rudérale. Le Gliricidia associé avec d'autres espèces arborées (fruitières et forestières), peut être aussi utilisé pour construire des haies vives. Dans tous les cas ces plantes sont des sources de biomasse pour l'alimentation animale. Il convient de mentionner que d'autres avantages peuvent être tirés dans la mesure où ces sols soient riches en MOS, régulation des polluants et/ou contaminants lors de la minéralisation (les éléments traces). Lorsque les sols sont nus, suite à de fortes pluies ou l'augmentation de la température, la minéralisation de la MOS augmente et cela peut libérer des contaminants. Ces derniers peuvent être lixiviés et altèrent la qualité de l'eau des nappes phréatiques et des cours d'eau avec des effets potentiels d'eutrophisation (ici uniquement N & P). En conséquence, cela provoque des problèmes de santé grave chez l'homme. Nous préconisons en ce sens des apports de la matière organique et du maintien d'un couvert végétal au niveau du périmètre irrigué. Lorsque ces sols sont carencés en MOS, cela provoque l'immobilisation temporaire de l'azote minéral du sol par la biomasse microbienne (faim d'azote). En ce sens, la fertilité chimique des sols via ces apports d'engrais est sensée bloquée au profit de la minéralisation et de la

lixiviation de N (entraînement de matières sous formes solubles). D'où la nécessité d'apporter aussi de la MOS dans ces sols, ce qui régulera les effets de minéralisation. La question des éléments traces métalliques associés à certains engrais reste posée, toutefois les épandages en Haïti sont faibles et l'exportation de ces éléments par les plantes cultivées dans ces sols carbonatés doit être démontrée.

➤ Cas du plateau non-irrigué

Pour le plateau non irrigué, l'implémentation des systèmes agroforestiers intra parcellaire est surtout recommandée (toutes espèces d'arbre confondues) pour faciliter tout d'abord un micro climat dans les parcelles mais aussi pour une amélioration de la structure du sol à long terme associée à une meilleure infiltration de l'eau.

Tenant compte du déséquilibre en nutriments constaté dans toutes les unités agroécologiques voire, dans tous les systèmes de cultures en particulier dans le système intensif et le système semi-intensif, il va falloir apporter dans les sols du phosphore. Ces sols sont fortement carbonatés et ce n'est pas tant la quantité mais l'offre et la mobilité des ions phosphate qui est en cause. Nous observons des niveaux peu importants en azote total : dans le plateau non irrigué le maintien au sol d'un microclimat par l'introduction des pratiques durables améliorera la réserve utile de ces sols qui, par la suite, contribuera à la réduction de la minéralisation de l'azote et la dénitrification. Ces pratiques doivent être associées à d'autres pratiques durables relatives à l'adaptation au changement climatique comme : la réduction de 50% à 75% l'usage des pesticides et des fertilisants minéraux, la fertilisation organo-minérale, le paillage du sol tout en valorisant également les résidus de culture des légumineuses, la réduction des pratique de brûlis et le paillage.

➤ Les situations de Plateau

En effet, lorsque les sols sont peu pourvus en matière organique (< 5%), les rendements sont plus variables selon les aléas climatiques. Dans ce cas, on peut donc avancer que la MOS contribue à la sécurité alimentaire. Dans le plateau de Saint-Raphaël (irrigué ou non irrigué), si les agriculteurs valorisent la rotation des légumineuses (cultivées et non cultivées), 250 à 550 kg d'azote à l'hectare pourraient être économisés annuellement. Actuellement le revenu moyen mensuel enregistré à Bouyaha se situe aux alentours de 17 000 HTG. L'utilisation des légumineuses représenterait un gain de près de 36 000 HTG compensées sur l'achat des engrais azotés. La question de la charge de travail aurait également posé suite à une alternative plus poussée vers l'agro-écologie. Ainsi, nous préconisons la valorisation accrue des résidus de récolte, le pâturage dans les périodes de jachères et la valorisation des légumineuses. En particulier, le pois-congo bisannuel qui est très négligé au niveau du périmètre irrigué car il a été remplacé par une variété non photopériodique de cycle court exigeante en intrants chimiques... Enfin, nous préconisons l'agroforesterie pour la connectivité des habitats écologiques fortement dégradés à Saint-Raphaël.

Nous sommes conscients que le crédit carbone est difficile voire impossible à mettre en application en Haïti, d'autant qu'en première approximation il ne serait pas rémunérateur, de plus il est fortement remis en cause au niveau international. D'autres leviers peuvent être mis en évidence comme les programmes de crédits agricoles accessibles aux agriculteurs les plus vulnérables sur le plan socio-économiques, la mise en place des programmes de sensibilisation via l'éducation agroécologique.

Références bibliographiques

- Adams AM, Gillespie AW, Kar G, Koala S, Ouattara B, Kimaro AA, Bationo A, Irenikatche Akponikpe PB, Schoenau JJ, Peak D. 2016. Long term effects of reduced fertilizer rates on millet yields and soil properties in the West-African Sahel. *Nutr Cycl Agroecosyst.*, **106**: 17–29. DOI: 10.1007/s10705-016-9786-x.
- ADEME, 2015. Organic carbon in soils: Meeting climate change and food security challenges.
- 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.

- Alam MK, Islam MM, Salahin N, Hasanuzzaman M. 2014. Effect of tillage practices on soil properties and crop productivity in wheat-mungbean-rice cropping system under subtropical climatic conditions. *The Scientific World Journal.*, **3**: 1-15. DOI: 10.1155/2014/437283.
- Albert B, Roberts TG, Harder A. 2017. Barriers Faced by Small Scale Farmers in the North Department of Haïti. *Journal of International Agricultural and Extension Education.*, 8-19. DOI: 10.5191/jiaee.2017.24302.
- Albrecht A, Angers DA, Beare MH, Blanchart E. 1998. Déterminants organiques et biologiques de l'agrégation : implications pour la recapitalisation de la fertilité physique des sols tropicaux. *Cahiers Agricultures.*, **7** : 357-363.
- 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.*, **27**(1) : 23-36.
- Ali M, Gosh PK, Hazra KK. (2014). Ressource conservation technologies in rice fallow. *Scientific Publishers (India)*, pp. 83-89.
- Amossé C. (2015). Analyse expérimentale de l'effet de couverts de légumineuses associés en relais à un blé d'hiver, conduit en agriculture biologique, sur les performances des cultures, la maîtrise des adventices et la dynamique de l'azote. Thèse doctorale. 126 p. DOI : 2013AGPT0009.
- Amato M, Ladd JN. 1992. Decomposition of ¹⁴C-labelled glucose and legume material in soils: Properties influencing the accumulation of organic residue C and microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry.* **24**(5): pp 455-464. DOI: 10.1016/0038-0717(92)90208-F.
- Andrianarisoa HS, Zeller 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:101016/jforeco200902037.
- 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.
- Arias D, Leguía JJ, Sy A. 2013. Determinants of agricultural extension services: The case of Haïti. Washington, DC: The World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/16291>. License: [CC BY 3.0 IGO](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/).
- Arrouays D, Feller C, Jolivet C, Saby N, Andreux F, Bernoux M, Cerri C. 2003. Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps. *Étude et Gestion des Sols.*, **10** (4): 347-355.

- Arrouays D, Saby N, Walter C, Lemercier B, Schwartz C. 2006. Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use and Management.*, **22**: 48–51. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00020.x>.
- Atchada CC, Zoffoun AG, Akplo TM, Azontonde AH, Tente AB, Djego JG. 2018. Modes d'utilisation des terres et stock de carbone organique du sol dans le bassin supérieur de Magou au Bénin. *Int J Biol Chem Sci.*, **12**: 2818-2829. DOI: 104314/ijbcsv12i627.
- Ay JS, Pousse N, Rigou L, Thannberger L. 2020. Vers une évaluation des coûts de la dégradation des sols : Éléments de cadrage, outil d'analyse et études de cas. *Etude et Gestion des Sols.*, **27**: 147-161.
- Bajoriene K, Jodaugiene D, Pupaliene R, Sinkeviciene C. 2013. Effect of organic mulches on the content of organic carbon in the soil. *Estonian Journal of Ecology.*, **62**(2):100-106. DOI: 10.3176/eco.2013.2.02.
- Baldock JA, Nelson PN. 2000. « Soil organic matter ». Sumner, M.E. (Editor-in-chief) 2000. *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton USA. pp. 825-884.
- Balesdent J, Arrouays D. 1999. Usage des terres et stockage de carbone dans les sols du territoire français. Une estimation des flux nets annuels pour la période 1900-1999. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **85** (6) : 265-277.
- Balesdent J, Chenu C, Balabane M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil & Tillage Research.*, **53**: 215-230.
- Balesdent J, Arrouays D, Chenu C, Feller C. 2004. Stockage et recyclage du carbone, in: Girard MC, Walter C, Rémy JC, Berthelin J, Morel JM (Eds.), *Sols et environnement*. Dunod., Paris, pp. 238–261.
- Bardgett RD, Mommer L, De Vries FT. 2014. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution.*, **29**(12): 692-699. DOI: 10.1016/j.tree.2014.10.006.
- 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.
- Barreteau D, Blanchart E, Saudubray F, Bernoux M, VIODÉ JP. (2004). Les stocks de carbone dans les sols des Antilles. Importance agronomique et environnementale. *Les cahiers du PRAM.*, **4** : 43 p.

- Batjes, N. h., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47, 151–163. doi:10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x.
- Bennani S., Dory V., 2003 : diagnostic agraire du bassin versant de la rivière Fond Melon. IRAM – CICDA – CROSE. 91p.
- Bernoux M, ChevAllier T. 2013. Le carbone dans les sols des zones sèches Des fonctions multiples indispensables. *Les dossiers thématiques du CSFD.*, **10**: Montpellier, France, CSFD/Agropolis International, 40 p. fdi:010061688.
- Betemariam EA, Vagen TG, Shephard KD, Winowiecki L. (2011). A Protocol for Measuring and Monitoring Soil Carbon Stocks in Agricultural Landscapes. World Agroforestry Centre (ICRAF), 19 p. 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**:19 p. <https://orcid.org/0000-0001-5572-1284>.
- Bispo A, Guellier C, Martin E, Sapijanskas J, Soubelet H et Chenu C. 2016. « Les Sols : Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable », *Versailles, Savoir faire Ed. Quae* : 384.
- 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.
- Bouvard A, Devienne S. 2020. Quelles voies de développement de l’agriculture dans les territoires montagneux haïtiens ? L’exemple de la région de La Borne dans la Chaîne des Matheux. *Les Cahiers d'Outre-Mer.*, **279** : 95-114. DOI : 10.4000/com.9937.
- Brabant P. 2010. Une méthode d’évaluation et de cartographie de la dégradation des terres. Proposition de directives normalisées. Les dossiers thématiques du CSFD. N°8. Août 2010. *CSFD/Agropolis International, Montpellier, France.* 52 p.
- Brookes P. 2001. The soil microbial biomass: concept, measurement and applications in soil ecosystem research. *Microbes and Environments.*, **16**(3):131-140. DOI : 10.1264/jsme2.2001.131.
- Brown G, Pashanasi B, Villenave C, Patron JC, Senapati BK, Giri S, Barois I, Lavelle P, Blanchart E, Blakemore RJ, Spain AV, Boyer J. 1999. Effects of earthworms on plant production in the tropics. *Tropical Agroecosystems*: 87-148. FDI: 010021557.
- Calvaruso C, Blanchart A, Bertin S, Grand C, Pierart A, Eglin T. 2021. 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. *Etude et Gestion des Sols.*, **28** : 3-29.
- Calvaruso C., Blanchart A., Bertin S., 2019 - Diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers: indicateurs de suivi et stratégies de déploiement. 80 p. Ouvrage prochainement disponible en ligne : www.ademe.fr/mediatheque.
- Cardinael R, Umulisa V, Toudert A, Olivier A, Bockel L, Bernoux M. 2020. Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems. *Environmental Research Letters.*, 15 (2020) 019501. 19 p. DOI:10.1088/1748-9326/aaeb5f.
- Celestin F, Mylavarapu R, Hochmuth G, Li Y, Jeune W, van Santen E. 2019. Response of black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to phosphorus fertilization in acidic and alkaline soils in Haïti. *Journal of Plant Nutrition.*, **43**, pp. 1016-1024. DOI: 10.1080/01904167.2019.1702208.
- CHCL, Agrisud International, GRADIMIRH, IRD. 2020. Rapport de micro-zonage 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 (MARNDR), Port-au-Prince, Haïti. <https://agriculture.gouv.ht>, 60 p.
- CHCL, Agrisud International, GRADIMIRH, IRD. 2022. Cartographie de la fertilité des sols à Saint-Raphaël Haïti. Consortium, 35 p.
- Chen J, Heiling M, Resch C, Mbaye M, Gruber R, Dercon G. 2018. Does maize and legume crop residue mulch matter in soil organic carbon sequestration? *Agriculture, Ecosystems and Environment.*, **265**:123-131. DOI: 10.1016/j.agee.2018.06.005.
- Chenu C, Virto I, Plante A, Elsass F. 2009. Clay-Size Organo-Mineral Complexes in Temperate Soils: Relative Contributions of Sorptive and Physical Protection. *The Clay Minerals Society*, Chantilly, VA, pp., 120-135. DOI: 10.1346/CMS-WLS-16.6.
- 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.
- 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, Ecosystème & Environment.*, 103 (2), pp. 375-387. DOI: 10.1016/j.agee.2003.12.009.
- Chevallier T, Woignier T, Toucet J, Blanchart E (2010) Organic carbon stabilization in the fractal pore structure of andosols. *Geoderma.*, **159**: 182–188. doi:10.1016/j.geoderma.2010.07.010.
- 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* : 137-155. DOI: 10.4060/cb0403fr.
- Chevassus-Au-Louis B. Salles J-M., Bielsa S., Richard D., Martin G., Pujol J-L, 2009. Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes – Contribution à la décision publique, 378p.
- Chotte JL, Albrecht a, Brossard M, Feller C. 1992. Effect of land use on the quality and quantity of organic matter in different soils of the Lesser Antilles. *Cahiers ORSTOM série Pédologique.*, **26** : 396-410.
- Chuku CA, Okoye C. 2009. Increasing resilience and reducing vulnerability in sub- Saharan African agriculture: Strategies for risk coping and management. *African Journal of Agricultural Research.*, **4** (13): 1524-1535.
- Clermont-Dauphin C, Cabidoche Y. M., Meynard J. M. 2004. Diagnosis on the sustainability of an upland cropping system of southern Haïti. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* DOI:10.1016/j.agee.2004.03.008.14 p.
- Clermont-Dauphin C, Meynard JM, Cabidoche YM. 2003. Devising fertilizer recommendations for diverse cropping systems in a region: the case of low-input bean/maize intercropping in a tropical highland of Haïti. *Agronomie.*, **23** (7): 673–681. DOI: 10.1051/agro: 2003046.
- 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.
- Corre-Hellou G, Fustec J, Crozat Y. (2006). Interspecific competition for soil N and its interaction with N₂ fixation, leaf expansion and crop growth in pea-barley intercrops. *Plant Soil*, **282** : 195–208. DOI:10. 1007/s11104-005-5777-4.
- Courte A. 2019, Le carbone des sols, la petite agriculture, ses systemes de production et pratiques, temoins des enjeux environnementaux et agricoles de la guyane. Thèse de Doctorat. Université de Guyane, Sciences Agronomiques.
- 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**. <https://doi.org/10.1051/cagri/2020019>. 9 p.
- Crowther TW, Todd-Brown KE O, Rowe CW, Wieder W R, Carey JC, Machmuller MB et al. 2016. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, **540**: 104-110.
- 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.
- De Vos, B., M. Van Meirvenne, P. Quataert, J. Deckers, and B. Muys. 2005. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:500–510. doi:10.2136/sssaj2005.0500.
- Deb, S, Bhadoria PBS, Mandal B, Rakshit, A, Singh, HB. 2015. Soil organic carbon: Towards better soil health, productivity and climate change mitigation. *Climate change and Environmental Sustainability*, 3(1): 26-34.
- Delerue F., 2009 : L'intégration des familles paysannes haïtiennes dans la lutte antiérosive à travers la cartographie participative. *Agronomes et Vétérinaires sans Frontières*. 18 p.
- Demenois J., Carriconde F., Rey F., Stokes A., 2017. Erosion, traits racinaires et mycorhizes : vers une meilleure compréhension des interactions pour la restauration écologique des forêts tropicales. Conference soil bio-and eco-engineering: the use of vegetation to improve slope stability, 11-15 juillet 2016, Sydney (Australie).

- Derrien D, Dignac M F, Basile-Doelsch I, Barot S, Cécillon L, Chenu C et al. 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/10.1007/s13593-017-0421-2).
- Dignac MF, Derrien D, Barré P, Barot S et al. 2017. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, **37**: 14. DOI 10.1007/s13593-017-0421-2.
- Dlugokencky E et Tans P. (2018). Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL). <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>.
- Dolisca, F., McDaniel, J., Teeter, L., Jolly, C., 2007. Land tenure, population pressure, and deforestation in Haïti: the case of Forêt des Pins Reserve. *Journal of Forest Economics.*, **13** (4), 277-289. DOI: 10.1016/j.jfe.2007.02.006.
- 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): 1643-1661. 9404-IJBCS. DOI: 10.4314/ijbcs.v17i4.28.
- Dulormne M, Sierra J, Sophie SA, 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 America Latina, 1999, Italia. 4 p. HYPERLINK "https://hal.inrae.fr/hal-02841706" \t "_blank" hal-02841706.
- Dulormne M, Sierra J, Nygren P, Cruz P. (2003) Nitrogen-fixation dynamics in a cut-and-carry silvopastoral system in the subhumid conditions of Guadeloupe, French Antilles. *Agroforestry Systems.*, **59**, pp. 121–129.
- Dumale WAJ, Miyazaki T, Taku N, Seki K. 2011. Short-Term Dynamics of the Active and Passive Soil Organic Carbon Pools in a Volcanic Soil Treated With Fresh Organic Matter. *E-International Scientific Research Journal.*, **3**(2):2094-1749. 19p.
- Dumas R. 2011. Haïti at the Intersection of the World: Tapping the Past, Facing the Future. University of California, Santa Barbara. **17** (2):124-145. <https://www.jstor.org/stable/41715437>.

- Eckstein D, Künzel V, Schäfer L. 2021. Global Climate Risk Index 2021. German Watch, Bonn, Germany, Garcia FHS, Rodrigues M, Pennacchi JP, et al. 2021. Sugarcane resilience to recurrent water deficit is dependent on the systemic acclimation of leaf physiological traits. *Tropical Plant Biology.*, **14**: 408–418. DOI: 10.1007/s12042-021-09303-5.
- 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.
- Erktan A, Cecillon 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.
- 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.
- FAO et ITPS. 2015. État des ressources en sols du monde | Résumé technique. ISBN 978-92-5-208960-5, 79 p.
- FAO. 2017. Carbone Organique du Sol: une richesse invisible Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie.
- FAO. 2019. Les multiples rôles du sol au Proche-Orient et en Afrique du Nord - Document d'orientation Rome 32 pp Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- FAO. 2021. TAPE - Outil pour l'évaluation de la performance de l'agroécologie 2019. Processus de développement et guide d'application. Version test. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4706fr>.
- Feller C, Albrecht A, Brossard M, Chotte JL, Cadet P, Hetier JM, Barrois I, Marriotti A, Castellanet C, De Guiran E, Clairon M, Daly P, Mahieu M, Pilgrim M, Ramdass A, Ahmad M, Griffith SM, Fardeau JC. 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, Chenu C, 2012 - Les interactions bio-organo-argileuses et la stabilisation du carbone dans le sol. *Étude et Gestion des Sols.*, **19**: 235-248.
- 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., Albrecht A. et Tessier D., 1996 - Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils. In: Structure and organic matter storage in agricultural soils. Carter M. R. et Stewart B. A. (Eds). CRC Press, New York.
- Feller C, Albrecht A, Brossard M, Chotte JL, Cadet P, Hétiér JM, Barrois I, Marriotti A, Castellanet C, De Guiran E, Clairon M, Daly P, Mahieu M, Pilgrim M, Ramdass A, Ahmad M, Griffith SM, Fardeau JC. (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, 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.
- 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.
- Fernández-Ugalde O, Virto I, Barré P, Apesteguía M, Enrique A, Imaz MJ, Bescansa P. (2014). Mechanisms of macroaggregate stabilisation by carbonates: implications for organic matter protection in semi-arid calcareous soils. *Soil Research.*, **52**, 180-192.
- Freschet GT, Violle C, Roumet C, Garnier E. 2018. Interactions entre le sol et la végétation : structure des communautés de plantes et fonctionnement du sol. Les sols au cœur de la zone critique : écologie (eds P. Lemanceau & M. Blouin), pp. 83-99. ISTE editions, London, UK.
- Fujisaki K. (2014). Devenir des stocks de carbone organique des sols après déforestation et mise en culture : une analyse diachronique en contexte amazonien / Mémoire de thèse. 237 p. Montpellier: Montpellier SupAgro.
- Fujisaki K., Chevallier T., Chapuis-Lardy L., Albrecht A., Razafimbelo T., Masse D., Badiane Ndour Y, Chottte 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.
- Gaba S, Lescourret F, Boudsocq S, Enjalbert J, Hensinger P, Journet EP, Navas ML, Wery J, Louarn G, Maléxieux E, Pelzer E, Prudent M, Hozier-Lafontaine H. 2015. Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. *Agronomy for Sustainable Development.*, **35** : 607–623 (2015).
- Gardi C, Angelini M, Barceló S, Comerma J, Cruz Gaistardo C, Encina Rojas A, Jones A, Krasilnikov P, Mendonça Santos Brefin ML, Montanarella L, Muñiz Ugarte O, Schad P, Vara Rodríguez MI, 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 p.
- Germon JC. 1998. Le rôle régulateur du sol dans le changement climatique. *Courrier de l'environnement de l'INRA* n°35, pp. 43-50.
- Gerke, J. 2022. The Central Role of Soil Organic Matter in Soil Fertility and Carbon Storage. *Soil Syst.*, **6**: 33. DOI: 10.3390/soilsystems6020033.
- Ghosh S, Sarkar S, Sau S, Karmakar S, Bramhachari K. 2017. Influence of Guava (*Psidium guajava* L.) based Intercropping Systems on Soil Health and Productivity in Alluvial Soil of West Bengal, India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences.*, **6**(11):241-251.
- GIEC. (2006). Guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Volume 4 Agriculture, forestry and other land use. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.
- GIEC. (2007). Working group III contribution of the IPCC Fourth Assessment Report. Climate change 2007: Mitigation of climate change . Summary for Policymakers. IPCC, Geneve.
- GIEC. (2014). IPCC, 2014. Climate Change 2014–Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects. Cambridge University Press.
- Gil JDB, Cohn AS, Duncan J, Newton P, Vermeulen S. 2017. The resilience of integrated agricultural systems to climate change. Volume 8, July/August 2017 15 p.
- Girard MC, Walter C, Remy JC, Berthelin J, Morel JL, 2005. *Sols et Environnement*. Dunod (Ed.) 816p.

- Gobat J.M. ; Aragno M. ; Matthey W. (2003) - Le sol vivant : Bases de pédologie, Biologie des sols. Presses polytechniques et universitaires romandes (Ed), 528p.
- 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 du sol.*, **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., **Version 1** : 210 p. (NNT :). (tel-00487882).
- Guo LB, Gifford RM. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Glob. Chang. Biol.*, **8**(4): 345–360. doi:10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x.
- Guo G, Zhang H, Araya K, Jia H, Ohomiya K, Matsuda J. 2006. Improvement of saltaffected soils, Part 3: Specific Heat of Salt-affected soils. *Biosystems Engineering.*, **97**: 413-418. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.11.007>.
- 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), pp. 189-217. DOI: 10.1191/0309133305pp443ra.
- Haider K, MARTIN JP. 1967. Synthesis and transformation of phenolic compounds by *Epicoccum nigrum* in relation to humic acid formation. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* **31**, 766772. DOI:10.2136/sssaj1967.03615995003100060019x.
- Halvorson AD, Wienhold B, Black al. 2002. Tillage, Nitrogen, and Cropping System Effects on Soil Carbon Sequestration. *Soil Science Society of America Journal.*, **66**(3) : 1435-0661. DOI: 10.2136/sssaj2002.0906.
- Hamon X, Dupraz C, Liagre F. 2011. Améliorer l'efficacité Agro-environnementale des Systèmes Agroforestiers, Synthèse bibliographique. Ministère de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Pêche 60p.
- Han S, Delgado-Baquerizo M, Luo X, Liu Y, Nostrand V, Chen W, Zhou J, Huang Q. 2021. Soil aggregate size-dependent relationships between microbial functional diversity and

- multifunctionality. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108143. *Soil Biology and Biochemistry.*, **154**. 8p.
- 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**: 124-133. DOI: 10.22004/ag.econ.231325.
- Hilbe JM. 2007. STATISTICA 7. The American Statistician, **61** (1): 91-94 DOI: 10.1198/000313007X172998.
- Homyak P.M., Allison S.D., Huxman T.E., Goulden M.L., Treseder K.K. (2017). Effects of drought manipulation on soil nitrogen cycling: A meta-analysis. *Journal Geophysical Research.*, **122**:3260–3272. DOI: 10.1002/2017JG004146.
- Houssoukpèvi IA, Aholoukpè HNS, Fassinou DJM, Rakotondrazafy MN, Amadji GL, Chapuis-Lardy L, Chevallier T. 2022. Biomass and soil carbon stocks of the main land use of the Allada Plateau (Southern Benin). **13**, NO. 1, 249–265. DOI: 10.1080/17583004.2022.2074314.
- Hurisso T., Culman S.W., Horwath W.R., 2016. Comparison of Permanganate-Oxidizable Carbon and Mineralizable Carbon for Assessment of Organic Matter Stabilization and Mineralization. *Soil Science Society of America Journal.*, **80** (5) 1352-1364. DOI:10.2136/sssaj2016.04.0106.
- IHSI. 2015. Population totale, population de 18 ans et plus, ménages et densités estimés en 2015. Port-au-Prince, Haïti. 129 p.
- Instituto Dominicano de investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF), 2010 - Caracterización de suelos en zonas cafetaleras de la República Dominicana: Resultados de Investigación. IDIAF Santo Domingo., 125 p.
- 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, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (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., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K.

Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. *Cambridge University Press. In Press.*

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2022. Climate Change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [HO Pörtner, DC Roberts, M Tignor, ES Poloczanska, K Mintenbeck, A Alegría, M Craig, S Langsdorf, S Löschke, V Möller, A Okem, B Rama, eds. Cambridge, UK and New York, USA: *Cambridge University Press.* DOI: [10.1017/9781009325844](https://doi.org/10.1017/9781009325844). 3056 p.

ISO 10390 (2021). Soil, treated biowaste and sludge – Determination of pH. <https://www.iso.org/obp/ui/#home>.

ISO 10693. (1998). Soil quality - Determination of carbonate content — Volumetric method. , <https://www.iso.org/obp/ui/#home>.

ISO 10694. (1995). Soil quality - Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis). <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 13878. (1998). Soil quality - Determination of total nitrogen content by dry combustion (“elemental analysis”). <https://www.iso.org/obp/ui/#home>.

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. 203 p

Jalonen R., Nygren P., Sierra J. (2009). Transfer of nitrogen from a tropical legume tree to an associated fodder grass via root exudation and common mycelial networks. *Plant Cell Environ.* 32:1366–1376. DOI: [10.1111/j.1365-3040.2009.02004.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02004.x).

Jean Pascal Pallo F, Sawadogo N, Prosper Zombré N, et al. 2009 - Statut de la matière organique des sols de la zone nord soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 13, pp. 139-142.

Jean-Denis S, Jean-Pierre D, Mutel M, Duchaufour H, Langlais C, Fernandes P, Alphonse ME, Malézieux E. 2014. Évolution de la structure d’un système agroforestier en relation avec le cycle de vie familial : cas du jardin de case en Haïti. *Bois et forêts des tropiques.*, **321** (3): pp 7-20.

- Jobbágy E.G. et 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.
- Jobbágy EG et 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.
- Jolivet C, Almeida-Falcon JL, Berché P, Boulonne L, Fontaine M, Gouny L, Lehmann S, Maître B, Ratié R, Schellenberger E, Soler-Dominguez N. 2018. Manuel du Réseau de mesures de la qualité des sols. RMQS2 : deuxième campagne métropolitaine 2016 – 2027. ISBN : 2-7380-1416-X. 135p.
- Jodaugiene D, Pupaliene R, Sinkeviciene A, Marcinkeviciene A, Zebrauskaite K, Baltaduonyte M et al. 2010. The influence of organic mulches on soil biological properties. *Zemdirbyste.*, **97**(2):33-40.
- Jones CG, Lawton JH, Shachack M. 1994. Organisms as ecosystems engineers. *Oikos*, 69, 373-386.
- Jones C, Robertson E, Arora V, Friedlingstein P, Shevliakova E, Bopp L, Brovkin V, Hajima T, Kato E, Kawamiya M. 2013. Twenty-first-century compatible co2 emissions and airborne fraction simulated by cmip5 earth system models under four representative concentration pathways. *Journal of Climate.*, **26**: 4398–4413. DOI:10.1175/JCLI-D-12-00554.1.
- Jose S, Dollinger J. 2019. Silvopasture: a sustainable livestock production system. *Agroforestry Systems.*, 93: 1–9. DOI: 10.1007/s10457-019-00366-8.
- Jose S, Gillespie AR, Pallardy SG. 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems.*, 61: pp. 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.
- Jules J, Paul B, Adam M, Andrieu N. 2023. Co-conception avec les producteurs de stratégies d'adaptation au changement climatique : le cas des exploitations agricoles en Haïti. *Cah. Agric.*, **32** (27). DOI : 10.1051/cagri/2023020.10p.
- Kane, D. 2015. Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices, s.l.: s.n.

- 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.
- Keestrea SD, Bouma J, Wallinga J, Tiftonell P, Smith P, Cerdà A, Montanarella L, Quinton JN, Pachepsky Y, Van der Putten WH, Bardgett RD, Moolenaar S, Mol G, Jansen B, Fresco LO. 2016. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL.*, **2**: 111-128.
- Kibblewhite M, Ritz K, Swift M, 2008. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences.*, **363** (1492). pp. 685-701. DOI :10.1098/rstb.2007.2178.
- 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.
- König D. 1992. The potential of Agroforestry methods for erosion control in Rwanda. *Soil Technology.*, **5** (2): 167-176. DOI:10.1016/0933-3630(92)90017-U.
- König D. 1993. L'agriculture écologique agroforestière – une stratégie intégrée de conservation des sols au Rwanda. *Bull. Réseau Érosion*, IRD, Montpellier, 12 : 130-139.
- Kumar A, Naresh RK, Singh S, Mahajan NC, Singh. 2019. Soil aggregation and organic carbon fractions and indices in conventional and conservation agriculture under vertisol soils of subtropical ecosystems: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences.*, **8** (10):2236-2253. DOI: 10.20546/ijemas.2019.810.260.
- Kushwaha CP, Singh KP. 2005. Crop productivity and soil fertility in a tropical dryland agro-ecosystem: impact of residue and tillage management. *Experimental Agriculture.*, **41**: pp 39-50. DOI: 10.1017/S0014479704002303.
- Lal R., Bruce J.P., 1999. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environmental Science & Policy.* **2**(2): 177-185. DOI: 10.1016/S1462-9011(99)00012-X.
- Lal R, Negassa W, Lorenz K. 2015. Carbon sequestration in soil. *Environmental Sustainability.*, **15**: 79-86, DOI: 101016/jcosust201509002.

- 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.
- Lal, R., 2016. Beyond COP 21: Potential and challenges of the “4 per Thousand” initiative. *J. Soil Water Conserv.*, **71**, 20A–25A. doi:10.2489/jswc.71.1.20A.
- 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.
- 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., Arneeth 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.
- Le Roux X., Barbault R., Baudry J., Burel F., Doussan I., Garnier E., Herzog F., Lavorel S., Lifran R., Roger-Estrade J., Sarthou J.P., Trommetter M. (éditeurs), 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, *INRA (France)*, 116p.
- Le Guillou C. (2011). Effets combinés de la qualité des résidus de culture et de la disponibilité en azote minéral sur la stabilisation de la structure du sol par les microorganismes. 125 p. Rennes-France: AgroCamus Ouest_Thèse doctorale.
- Lehmann J et Kleber M. 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature.*, **528**, pp. 60–68. DOI : 10.1038/nature16069.
- 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) : 45-65.
- 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 carbone in the dry-hot valley region of southern China. *CATENA.*, **201** (155): DOI : 10p. DOI: 101016/jcatena2021105187.

- Lilin C. 1986. Histoire de la restauration des terrains en montagne au 1ge siècle. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, **22** (2), 1986: 139-145.
- Litrico I, Barkaoui K, Barradas A, Barre P, Béguier V, Birouste M et al. (2016). Utiliser les mélanges fourragers pour s'adapter au changement climatique : opportunités et défis. www.afpf-asso.org, P. 11-20.
- Lorenz K, Lal R, Shipitalo MJ. 2011. Stabilized Soil Organic Carbon Pools in Sub-soils under Forest Are-Potential Sinks for Atmospheric CO₂. *Forest Science.*, **57**(1):19-25. DOI: 10.1093/forestscience/57.1.19.
- Lorenz K., Lal R., 2014. Soil organic sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development.*, **34** (2), 443-454.
- Magamana AE, Gadedjisso-Tossou A, Blavet D, Hien E, Chotte JL. 2021. Dégradation de la fertilité des sols et de l'environnement dans la Région des Savanes uu Nord-Togo : Analyse des perceptions et stratégies d'adaptation indigènes. *European Scientific Journal.*, **17**(25): 40-65. 10.19044/esj.2021.v17n25.
- Mahdi M, Al-Kaisi1, Rattan L, Kenneth RO, Birl L. 2017. Fundamentals and Functions of Soil. Environment, Soil Health and Intensification of Agroecosystems. DOI: 101016/B978-0-12-805317-100001-4 23p.
- Maignen R. 1980. Manuel pour la description de sols. ORSTOM 2-7099-0568., **10**. 112 p.
- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., De Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: Concepts, tools and models: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **29**(1), 43-62.
- Malhi, Y., Rowland, L., Aragão, L. E. O. C., and Fisher, R. A. 2018. New insights into the variability of the tropical land carbon cycle from the El Niño of 2015/2016, *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, **373**, 270-298, doi :10.1098/rstb.2017.0298.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurale-Ontario (MAAARO). 2018. Manuel sur la fertilité du sol. Publication 611F. *Université de Guelph*. 236p.
- Manlay RJ, Chotte JL, Masse D, Laurent JY, Feller C. 2002. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna: III. Plant and soil components

- under continuous cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment.*, 88 (3): 249-269. DOI: 10.1016/S0167-8809(01)00220-1.
- Manlay RJ, Masse D, Chevallier T, Russell-Smith, Friot D, Feller C. 2004. Post-fallow decomposition of woody roots in the West African savanna. *Plant and soil.*, **260**: 123–136.
- 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.
- Marie M, P, Le Gouee, Bermond M. 2008. De la terre au sol : des logiques de représentations individuelles aux pratiques agricoles. Etude de cas en Pays d’Auge. *Etude et gestion des sols, INRA*, **1** : 19-35.
- MARNDR. 2012. Synthèse nationale des résultats du recensement général de l’agriculture (RGA) 2008/2009. Port-au-Prince, Haïti. 217 p.
- Marschner, B., Brodowski, S., Dreves, A., Gleixner, G., Gude, A., Grootes, P. M., Hamer, U., Heim, A., Jandl, G., Ji, R., Kaiser, K., Kalbitz, K., Kramer, C., Leinweber, P., Rethemeyer, J., Schäffer, A., Schmidt, M. W. I., Schwark, L. & Wiesenberg, G. L. B. 2008. How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171: 91-110.
- Martínez E., J.P. Fuentes, et E. Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. 29 p. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Producción Agrícola.
- 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.
- Masson AS, Vermeire ML, Leng V, Simonin M, Tivet F, Thi HN, Brunel C, Suong M, Kuok F, Moulin L, Bellafiore S. 2022. Enrichment in biodiversity and maturation of the soil food web under conservation agriculture is associated with suppression of rice-parasitic nematodes. *Journal of International Agricultural and Extension Education*. DOI: 10.1016/j.agee.2022.107913, 15 p.
- Mayer J, Buegger F, Jensen E, Schloter M, Hess J. 2003. Residual nitrogen contribution from grain legumes to succeeding wheat and rape and related microbial process. *Plant and Soil.*, **255**: 541-554. DOI: 10.1023/A: 026081015076.

- McGarry D, Bridge BJ, Radford BJ. 1999. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics. *Soil and Tillage Research.*, **53** (2): 105-115. DOI: 10.1016/S0167-1987(99)00091-4.
- Michael Smith C. 2021. Conventional breeding of insect-resistant crop plants: still the best way to feed the world population. *Insect Science.*, **45**: 7–13 DOI: 10.1016/j.cois.2020.11.008.
- Mikha MM, Benjamin JG, Vigil MP, Nielson DC. 2014. Cropping intensity impacts on soil aggregation and carbon sequestration in the central great plains. *Soil and Water Management Conservation.*, 74(5):1712- 1719. DOI: 10.2136/sssaj2009.0335.
- 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., 2017b. Soil carbon 4 per 1000. *Geoderma.*, **292**:59–86. doi:10.1016/j.geoderma.2017.01.002.
- Ministère de l'Environnement (MDE). 2019. Sixième rapport national sur la biodiversité d'Haïti. 199 p.
- 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, pp. 71-85.
- Monger HC, Kraimer RA, Khresat S, Cole DR, Wang X, Wang J. 2015. Sequestration of inorganic carbon in soil and groundwater. *Geology.*, **43** : 375–378. DOI: 10.1130/G36449.1.
- Muruganandam S, Lsrael DW, Robarge WP. Activities of nitrogen-mineralization enzymes associated with soil aggregate size fractions of three tillage systems. *Soil Biology and Biochemistry.*, **73** (3):751-759. 42. DOI:10.2136/sssaj2008.0231.
- Nadeau MB, Hénault-Ethier L, Junior rony F, Michel G, Monette M. (2018). Restauration des paysages forestiers et agroforestiers en haïti. *Haïti Perspectives.*, **6** (4): pp 33-42.
- Nair P.K.R., Kumar B.M., Nair V.D., 2009a. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *J. Plant Nutri. Soil Sci.* **172**: 10–23.

- Nair PKR, Nair VD, Kumar BM, Haile SG. 2009b. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Environmental Science & Policy.*, **12**: 1099–1111 DOI :10.1016/j.envsci.2009.01.010.
- Nair, P.K.R., 2012. Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check. *Agrofor. Syst.* 86, 243–253. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9434-z>.
- National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA). (2022). Earth System Research Laboratories: Global Monitoring Laboratory. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>.
- Ndayizigiye F. 1994. Haies vives de légumineuses arbustives et fumures organiques et minérales complémentaires pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. pp. 591-603.
- Naudin C, Corre-Hellou G, Pineau S, Crozat Y, Jeuffroy MH. 2010. The effect of various dynamics of N availability on winter pea–wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation. *Field Crops Research.*, **119**: 2–11. DOI:10.1016/j.fcr.2010.06.002.
- O'Brien KL, Leichenko RM. 2000. Double exposure: Assessing the Impacts of climate change within the context of economic globalization. *Global Environmental Change.*, **10** (3): 221-232. DOI: 10.1016/S0959-3780(00)00021-2.
- Pallo FJP, Sawadogo N, Sawadogo L, Sedogo MP, Assa A. 2008. Statut de la matière organique des sols dans la zone soudanaïenne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2008 12(3), 291-301.
- Paul B et Maxime J. 2017. La vulgarisation agricole : un outil de réduction de l'insécurité alimentaire en Haïti. *Perspectives*, **5** (4) : 25-30.
- Paul, E. 2014. Soil microbiology, ecology and biochemistry. *Academic Press*. pp. 598.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P., Smith, P., 2016. *Climate-smart soils*. *Nature.*, **532**, 49–57. DOI:10.1038/nature17174.
- Peel M. C., Finlayson B. L., McMahon T. A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences.*, **11**: 1633–1644. www.hydrol-earth-syst-sci.net.
- 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.

- 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.
- Pienaar, C., & Sacks, J. (2012). Agricultural development and investment opportunities in the Cap Haïtien development corridor, Haïti. Retrieved from United States Agency for International Development website: http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pnady. 576 pdf.
- 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.
- PNUD & MCI. (2014). Produits typiques d'Haïti. Les Potentialités économiques, PNUD-Haïti.
- Programme Alimentaire Mondial (PAM). (2023). Haïti : Analyse des conditions de sécheresse. 5 p.
- Rabot E., Keller C., Ambrosi J.-P. Robert S., 2017 - Revue des méthodes multiparamétriques pour l'estimation de la qualité des sols dans le cadre de l'aménagement du territoire. *Etude et Gestion des Sols.*, **24**. pp. 59-72.
- Ramakrishnaa A, Tamb HM, Wania SP. 2006. Long TD. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam. *Field Crops Research.*, **95**(2-3):115-125. DOI : 10.1016/j.fcr.2005.01.030.
- Ramesh T, Hazarika S, Choudhury BU, Das A, Balusamy A, Krishnappa R, Joymati Chanu L, Ngachan SV. (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.
- 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.
- 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. *EGS*, **17** : 143-158.
- 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** : 143 à 158.

- Razafimbelo-Andriamifidy T.M., 2011. Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : bilans et protection. 82 p.
- Recous S, Lashermes G, Bertrand I. 2017. Couplages et contrôles des cycles du carbone et de l'azote par les communautés microbiennes dans les sols cultivés. Les sols et la vie souterraine: Des enjeux majeurs en agroécologie. *Editions Quae*, 978-2-7592-2651-1. fihal-01543489. 328 p.
- Rhodes, C.J., 2016. The 2015 Paris Climate Change Conference: COP21. *Sci. Prog.* 99, 97-104. DOI:10.3184/003685016X14528569315192.
- Roland Sférian. Cycle du carbone global: Variabilité, Rétroactions et Couplages aux interfaces. Océan, Atmosphère. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2019. ffitel-03420520. 116 p.
- Roose E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin Pédologique FAO Rome,70, 420 p. Disponible en ligne: <http://www.fao.org/docrep/t1765f/t1765f00.htm>.
- SACAD-FAMV, 1994. Paysans, systèmes et crises. Tome 1 : Histoire agraire et développement. Tome 2 : Stratégie et logique sociales. Tome 3 : Dynamique de l'exploitation paysanne. Port-au-Prince, Haïti, SACAD-UAG/FAMV, 363 p., 298 p., 476 p.
- Schietecatte LS, Audebert P, Umulisa V, Dionisio D, Bernoux M. (2022). The Nationally Determined Contribution Expert Tool (NEXT): A Comprehensive Greenhouse Gas Accounting Tool to Support Annual Environmental Impact Assessment Over a 30-Year Time Series in the Agriculture, Forestry and Other Land Use Sector. *Front. Clim.*, 4: 906142. doi: 10.3389/fclim.2022.906142. 18 p.
- Sagar L. and Singh S. 2020. Impact of agronomic practices on soil organic carbon dynamics: A review. *International Journal of Chemical.*, 8 (4):2173-2178. DOI: 10.22271/chemi.2020.v8.i4x.995.
- Sahoo UK, Singh SL, Gogo A, Kenye A, Sahoo SS. 2019. Active and passive soil organic carbon pools as affected by different land use types in Mizoram, Northeast India. *PLOS ONE*. 2019; 14(7):1-16. DOI:10.1371/journal.pone.0219969.
- Salomon W, Sikuzani YU, Kouakou M, Barima YSS., Theodat JM, Bogaert J. 2021. Cartographie et quantification de la perte du couvert forestier dans les parcs nationaux du Sud de la République d'Haïti de 1985 à 2018: rôle des activités agricoles locales.

- International Journal of Biological and Chemical Sciences., **15** (2): 477-496. DOI: 10.4314/ijbcs.v15i2.9, pp 477-496.
- Samaké O, Stomph TJ, Kropff MJ, Smaling EMA. 2006. Integrated pearl millet management in the Sahel: Effects of legume rotation and fallow management on productivity and *Striga hermonthica* infestation. *Plant and Soil.*, **286** : 245-257. DOI: 10.1007/s11104-006-9041-3.
- Scherr SJ, Mcneely JA. 2008. Biodiversity conservation and agricultural sustainability: towards a new paradigm of 'ecoagriculture' landscapes. *Royal Society.*, 1491: 477-494. www.jstor.org/stable/20208445.
- Sebillotte M. 1978. La collecte des références et les progrès de la connaissance agronomique. In *Exigences Nouvelles pour L'agriculture, les Systèmes de Culture Pourront-ils S'adapter?*, eds J. Boiffin, P. Huet & M. Sebillotte. ADEPRINA INA-PG., pp 466-496.
- Séférian, R., Delire, C., Decharme, B., Voldoire, A., Salas y Melia, D., Chevallier, M., Saint-Martin, D., Aumont, O., Calvet, J.-C., Carrer, D., Douville, H., Franchistéguy, L., Joetzjer, E., and Sénési, S.: Development and evaluation of CNRM Earth system model – CNRM-ESM1, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1423-1453, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1423-2016>, 2016.
- Šeparović L, Alexandru A, Laprise R, Martynov A, Sushama L, Winger K, Valin M. (2013). Present climate and climate change over North America as simulated by the fifth-generation Canadian regional climate model. *Springer*, 41 : 3167-3201. DOI :10.1007/s00382-013-1737-5.
- Sharma G, Sharma LK, Sharma KC. 2019. Assessment of land use change and its effect on soil carbon stock using multitemporal satellite data in semiarid region of Rajasthan, India. *Ecological Processes.*, **42**(8):1-17. DOI: 10.1186/s13717-019-0193-5.
- Sheil D, Puri R K, Basuki I, Van Heist M, Wan M, Rukmiyati NL, Sardjono MA, Samsedin I. 2004. À la découverte de la biodiversité, de l'environnement et des perspectives des populations locales dans les paysages forestiers. *Méthodes pour une étude pluridisciplinaire du paysage*. Center for International Forestry Research., 97 p.
- Sileshi GW. 2016. The magnitude and spatial extent of influence of *Faidherbia albida* trees on soil properties and primary productivity in drylands. *Journal of Arid Environments.*, **132**: 1-14 DOI: 10.1016/j.jaridenv.2016.03.002.

- Singh M, Sarkar B, Sarkar S, Churchman J, Bolan N, Mandal S et al. 2018. Stabilization of soil organic carbon as influenced by clay mineralogy. *Advances in Agronomy*. **148**:33-84. DOI: 10.1016/B978-0-12-811687-6.00003-1.
- Six J, Conant RT, Paul EA, Paustian K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil.*, **241**: 155-176.
- Six J, Frey SD, Thiet RK, Batten KM. 2006. Bacterial and Fungal contributions to Carbon Sequestration in Agrosystems. *Soil Science Society of America.*, **70**(2): 555-569.
- Smolikowski B (1993). La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES): une nouvelle stratégie de lutte antiérosive en Haïti. *Cahier Orstom, Série pédologique.*, **28** (2). pp 229-252.
- Soltner D., 1996. Les bases de la production végétale - Phytotechnie générale. Sciences et techniques agricoles, 21^e édition, Tome 1, le sol et son amendement, 468p.
- 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 zaï en zone Nord soudanienne du Burkina Faso. *Int J Biol Chem Sci.*, **9** (2): 954-969. DOI: 104314/ijbcsv9i232.
- Stockmann U, Adams, MA, Crawford JW, Field DJ, Henakaarchchi N, Jenkins M, Minasny B, McBratney AB, de Courcelles V, Singh K, Wheeler I, Abbott L, Angers DA, Baldock J, Bird M, Brookes PC, Chenu C, Jastrow JD, Lal R, Lehmann J, O'Donnell AG, Parton WJ, Whitehead D, Zimmermann M. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **164**: 80–99. doi:10.1016/j.agee.2012.10.001.
- Stockmann, U., Padarian, J., McBratney, A., Minasny, B., de Brogniez, D., Montanarella, L., Hong, S.Y., Rawlins, B.G., Field, D.J., 2015. Global soil organic carbon assessment. *Glob. Food Secur.*, **6**, 9–16. doi:10.1016/j.gfs.2015.07.001.
- Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions. *Soil Biology and Biochemistry.*, **58**: pp 115-126. DOI: 10.1016/j.soilbio.2012.11.012.
- Théodat JM. 2001. Le jaden, berceau de l'identité haïtienne. *Géographie et Cultures.*, **37** : 117-133.

- Théodat JM, BARTHE F. 2007. Les lieux du sacré : candomblé et vaudou haïtien. In : Landy F., Lézy E. (dir.). Les raisons de la géographie. Paris, France, Karthala.
- Thévenot M, Dignac MF, Rumpel C. 2010. Fate of lignins in soils: a review. *Soil Biology and Biochemistry.*, **42**: 1200-1211.
- Torquebiau E. 2017. Le changement climatique, un défi pour la recherche : l'exemple de l'initiative « 4 % ». *OCL.*, **24**, D108. doi:10.1051/occl/2016054.
- Torrallba M, Fagerholma N, Burgess PJ, Moreno G. 2016. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment.*, **230**: 150-161. DOI: 10.1016/j.agee.2016.06.002.
- Thoumazeau A, Bessou C, Renevier MS, Panklang P, Puttaso P, Peerawat M, Heepgnoen P et al. 2019. Biofunctool : a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part B: investigating the impact of land management of rubber plantations on soil quality with the Biofunctool index. *Ecological Indicators.*, **97** (2019) 429–437. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.10.028
- Toukara A, Clermont-Dauphin C, Affholder F, Ndiaye S, Masse D, Cournac L. 2020. Inorganic fertilizer use efficiency of millet crop increased with organic fertilizer application in rainfed agriculture on smallholdings in central Senegal. *Journal of International Agricultural and Extension Education.*, **294**: 1-11. DOI: 10.1016/j.agee.2020.106878, 11 p.
- 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: 10.1016/j.ecolind.2014.04.024.
- Van der Wal, A. & De Boer, W. 2017. Dinner in the dark: Illuminating drivers of soil organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry.*, **105**: 45-48.
- Van Wambeke A. (1992). Soils of the Tropics: Properties and appraisal. McGraw-Hill, London.
- Van-Camp L., Benilde Bujarrabal1 , A. R. Gentile2 , R. J. A. Jones, L. Montanarella , C. Olazabal1, S.K Selvaradjou, 2004. Reports of the technical working groups established under the thematic strategy for soil protection. III: Organic matter. EUR 21319 EN/3. Luxembourg: *Office for Official Publications of the European Communities*, 311-496.
- Velasco H, Torres Astorgaa R, Joseph D, Antoine JS, 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 Haïti. *Journal of Environmental Radioactivity*. **183**: pp. 7-16. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.12.008.
- Villeneuve C, Chauvin C, Puissant J, Henaux M, Trap J. 2022. Impact des pratiques agricoles sur l'état biologique du sol : SIPANEMA, un outil d'aide à la décision basé sur les nématodes. *Etude et Gestion des Sols.*, **29**, 199-209.
- Von Lützow M, Kögel-Knabner I, Ludwig B, Matzner E, Flessa H, Ekschmitt K, Guggenberger G, Marschner B, Kalbitz K. 2008. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model. *J Plant Nutr Soil Sci.*, **171**: 111–124. doi:10.1002/jpln.200700047.
- Wang S, Zuo Q, Cao Q, Wang P, Yang B, Zhao S, Cao R, Chen M. 2021. Acceleration of soil N₂O flux and nitrogen transformation during tropical secondary forest succession after slash-and-burn agriculture. *Soil Till Res.*, **208**:104868. DOI: 101016/j.still2020104868.
- Wang X, Tang C, Baldock JA, Butterly CR, Gazey C. 2016. Long-term effect of lime application on the chemical composition of soil organic carbon in acid soils varying in texture and liming history. *Biology and Fertility of Soils.*, **52**(3):295-306. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.199.
- Weil RR, Magdoff F. 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. In: Soil organic matter in sustainable agriculture. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 45-65.
- Wezel A, Haigis J. 2002. Fallow cultivation system and farmers' resource management in niger, west Africa. *Land degradation & development.*, **13** : 221-231. DOI: 10.1002/ldr.499.
- Williams VVJ. 2011. A case study of the desertification of Haïti. *Journal of Sustainable Development.*, **4** (3), 20, DOI: 10.5539/jsd.v4n3p20.
- Wu H, Guo Z, Gao Q, Peng C. 2009. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 129:413-421. DOI: 10.1016/j.agee.2008.10.020.
- 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.
- Xiao L, Zhou S, Zhao R, Greenwood P, Kuhn NJ. (2020). Evaluating soil organic carbon stock changes induced by no-tillage based on fixed depth and equivalent soil mass approaches. *Agriculture, Ecosystems & Environment.*, **300**. DOI: 10.1016/j.agee.2020.106982. 10 p.

- Yadav GS, Mitran T, Meena BL. 2018. Legumes for Soil Health and Sustainable Management. *Legum. Soil Heal. Sustain. Manag.* DOI :10.1007/978-981-13-0253-4.
- Zamanian K, Zhou J, Kuzyakov Y. 2021. Soil carbonates: The unaccounted, irrecoverable carbon source. *Geoderma.*, **384**. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114817.
- Zelaya P, Harder A, Roberts G. 2016. Small-Scale Farmers' Perceptions of Agricultural Information Sources in Northern Haïti. *Journal of International Agricultural and Extension Education.* **23**(2):63-77. DOI:10.5191/jiaee.2016.23205.
- Zhou Z, Wang Y, An Z, Li R, Xu Y, Zhang P, Yang Y, Wang T. 2022. Deep root information “hidden in the dark”: A case study on the 21-m soil profile of Robinia pseudoacacia in the critical zone of the Chinese loess Plateau. *CATENA.*, **213** (2022). 11 p. 106121. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106121.

ANNEXES

A : Questionnaire sur la typologie des systèmes de culture à Saint-Raphaël

Identification de la zone

Fiche:

Section communale /Localité/Habitation :

Zone agroécologique

Enquêté (e) :
.....
.....

Enquêteur :
.....

Coordonnées géographiques :
.....

A- INVENTAIRE AGRO-ENVIRONNEMENTALE

1- CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE L'AIRE GÉOGRAPHIQUE ÉTUDIÉE

Caractéristiques agro-climatiques du milieu étudié

Zone de culture (Plaine) irriguée Zone de culture sèche en Montagne dégradée Zone de culture sèche de plateau Zone d'agroforesterie peu dense Zone d'agroforesterie dense
 Zone arborée (Rack) Champ

Commentaire éventuel :

2- DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT DU PROFIL

a) Caractéristiques géomorphologiques des terrains identifiés (Environnement géomorphologique) :

Versant 1- bas de versant / 2 – au tiers inférieur du versant / 3 – à mi-hauteur du versant / 4 – au tiers supérieur du versant / 5 – au sommet du versant

Caractéristiques topographiques des terrains identifiés : Pentas Piedmont
 Plateau Vallée profil en crête

b) Orientation de la pente : à la boussole la situer (ex N-O, S-E etc)

c) Situation morphologique locale : 1/ sur une bosse (platon) / dans un creux (bas fond) / sur une pente régulière (flanc de montagne)

- **Antécédents climatiques :**
- **Durée :** 2-3jours précédents 2-3 Semaines précédentes :
- **Nature :** Pluie, rosée, Temps secs, ensoleillé
- **Intensité :** Faible Moyenne Forte

d) Caractéristiques pédologiques de la zone étudiée (Environnement pédologique)

- **Type de sols rencontrés dans le milieu**
- Argileux Sablonneux Limoneux
- Préciser la combinaison qui parait la plus appropriée :.....
- **Couleur de sols rencontrée dans le milieu :** Noir Rouge Brun
- Structure du sol : structure grumeleuse Structure lamellaire Structure polyédrique Structure massive ou compacte

e) Environnement géologique

- Pierrosité (roches ou cailloux dont le diamètre n'excède pas 20 cm)
- Non pierreux (< 0.01 %) Légèrement pierreux (0.01-0.1 %) Pierreux (0.1-3%)
- Très pierreux (3-15%) Fortement pierreux (15-50%) Excessivement pierreux (>50)
- Affleurement rocheux ? Oui Non
- Nature du matériau originel : Roche Calcaire Roche volcanique Roche sédimentaire Roche basaltique
- Continuité de la couverture pédologique :
- Continue (80 %) Discontinue (20-80 %) Très discontinue (<20 %)
- Épaisseur de la couverture pédologique (Profondeur du sol)
- Épais (> 80 cm) Peu épais (40 – 80 cm) Mince (< 40 cm) variables (quel écart ?) :
- Types d'érosion / apports
- Ni érosion ni apports Battance (splash) Érosion en nappes Érosion en rigoles Érosion en ravines Érosion éolienne Apports éoliens Apports fluviaux Apports par ruissellement Apport par submersion Apports par colluvionnements

f) Environnement hydrologique (types d'eau ou origine de l'eau) :

Eau d'irrigation Eau de la nappe eau de source eau de pluie eau de ruissellement eau lacustre eau courante

g) Environnement végétal

- Type de formation végétale : (ici cela s'applique à des formations naturelles ou de recru)

Formation ligneuse haute dense (>75 %) Formation ligneuse haute (25-75 %) Formation ligneuse claire (< 25 %) Savane Formation herbacée Sol nu

- Hauteur des différentes strates éventuelles en mètres.

Strates arborée strates arbustives strates suffrutescentes strates herbacées

- Recouvrement

Très Clairsemée (0-5%) Extrêmement ouvert (5-10%) Très ouvert (10-25%) Ouvert (25-50) Assez ouvert (50-70) Peu ouvert (75-90%) Fermé (>90%)

- Les espèces dominantes (5-7) :

- Présence des résidus de culture (Matières organiques)

- Etat de décomposition et degré de celle-ci : résidus décomposés résidus verts et secs : partiellement décomposés Résidus secs : peu décomposés Très peu de résidus visibles : non décomposés Pas de résidus

h) Environnement humain

- Mode (type) d'occupation du terrain

Site urbain carrière en exploitation carrière abandonnée arboriculture verger arboriculture monoculture culture en rotation monoculture (Rizières, Canne-à-sucre autres) culture en jachère pâturage prairie terrains humides forêts

i) Pratiques agronomiques relatives à la gestion des terres et la fertilité du sol

Culture en relais culture associée / intercalaire culture en bande / en courbe de niveau culture de couverture - conserver davantage la couverture de végétation (agroforesterie) Paillage Compostage (ligne provisoire de déchets) Autres

j) Gestion de fertilité du sol/Matières organiques

Plantation de légumineuses (champs et pâturages induisant la fertilité) Engrais vert (terres cultivées) Épandage d'engrais / compost / résidus (fertilisants organiques) « Épandage de fertilisants minéraux (inorganiques) Amendements calciques (la chaux) Rotation / jachères Autres

k) Traitements de la surface du sol

Labours de conservation (non-labour, labour minimum et autres types de labours provoquant de faibles troubles du sol de surface) billonnage Trouaison, refait annuellement ou en séquence de rotation autres

l) Couverture du sol par des arbres et d'arbustes

En bordure (haie vive) linéaire (contre le vent et/ou embocagement) parcelles d'arbres (verger) végétation naturelle (Rack) cultures pérennes fourrages pérennes et espèces à brouter.

m) Comment l'agriculteur a-t-il défriché son terrain et destination des herbes?

Brulis Rampe Alimentation animale Autres

n) Gestion de la ressource en eau/ Environnement hydrologique (irrigation, canaux de drainage) :

Pas d'irrigation irrigation par gravité irrigation par aspersion irrigation par submersion irrigation localisée : goutte à goutte

o) Travaux de mise en valeur des terres (aménagement)

Butte Billons Plates-bandes (planches) Terrasses Labours Aucune modification

p) Présence et types de clôtures

Clôtures vivantes (Haies, rangées d'herbacées et d'arbres) clôtures mortes ou artificielles pas de clôtures

q) Stade d'exploitation forestière (d'essences) :

Coupe récente Coupe rase Exploitation anarchique peuplement jeune < 10 cm de diamètre (Gaulis) semis (Plantules associées aux herbacées)

r) Modification phytologiques : Aucune Déboisement brulis reboisement

friches défrichement éclaircissement enrichissement

s) Intensité d'exploitation

Exploitation intensive Exploitation extensive

Nature des cultures :

Actuelles :

Précédents 1 :

Précédents 2 :

B- CONDUITE D'ÉLEVAGE :

à la corde libre

Espèces rencontrées :

t) Menu bétail :

u) Gros bétail :

Interaction entre le système d'élevage et le système de culture :

Informations supplémentaires : -----

C- INFORMATIONS RELATIVES A LA PERCEPTION DES AGRICULTEURS (en atelier)

Qu'entendez-vous par qualité d'un sol ?	
Importance de la MOS à l'égard des sols	
Importance des légumineuses à l'égard des sols	
Parmi ces unités paysagères, laquelle semble la plus dégradée et pourquoi ?	<input type="checkbox"/> Zone de culture (Plaine) irriguée <input type="checkbox"/> Zone de culture sèche en Montagne dégradée <input type="checkbox"/> Zone de culture sèche de plateau <input type="checkbox"/> Zone d'agroforesterie peu dense <input type="checkbox"/> Zone d'agroforesterie dense <input type="checkbox"/> Zone arborée (Rack) <input type="checkbox"/> Champ
Évolution du rendement durant ces 10 ans	<input type="checkbox"/> En Baisse <input type="checkbox"/> Stable <input type="checkbox"/> Augmente <input type="checkbox"/> Autres :
Quel lien entre les systèmes de production ?	

D- LISTE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR CLASSER LES SYSTEMES DE CULTURE

Variables d'étude des Systèmes de culture	Cochez la case correspondant à la bonne réponse
Fréquence des labours sur 10 ans	
[0]	
[1 à 10]	
[11 à 20]	

[21 à 30]	
Fréquence de légumineuses sur 10 ans	
[0 à 5]	
[6 à 20]	
[21 à 30]	
[31 à 50]	
Nombre d'espèces associées sur 10 ans	
[0-10]	
[11 à 30]	
[31 à 60]	
[61 à 90]	
Nombre de cultures associées sur 10 ans	
[0-10]	
[11 à 30]	
[31 à 60]	
[61 à 90]	
Durée de la jachère / 3-120 mois	
[0 à 2]	
[3 à 6]	
[60-120]	
Fréquence d'apport de matière organique l'an (suivant une échelle de 1 à 10)	
[1 à 2,5]	
[3 à 5]	
[6-7,5]	
[8-10]	
Dose moyenne annuelle d'engrais chimique (Kg/ha/an)	
[0 Kg]	
[40 à 265]	
[270 à 1636]	
Nombre des rotations sur 10 ans	
[0]	
[2 à 4]	
[5 à 6]	
[7 à 10]	
Dose moyenne annuelle de pesticide pur (l ha⁻¹ an⁻¹)	
[0]	
[1 à 9]	
[10 à 15]	
[16 à 36]	
Nombre d'arbres par ha	
[1 à 5]	
[6 à 9]	
[10 à 15]	
[26 et plus]	

E : Variation de quelques paramètres physico-chimiques selon la profondeur. Première campagne de description des profils de sols (Mars à Juin 2021).

Profil	Profondeur cm	Couleur Sec humide	Da g cm ⁻³	Eléments grossiers	pH eau	Ntot	Ctotal	C inorg.
Système Intensif (SI)								
1	0-10	5Y2.5/6	1,84	0,015	8,01	0,13	2,05	0,20
	10-30	5Y2.5/6	1,60	0,036	8	0,08	1,26	0,19
	30-50	5Y3/4	1,68	0,051	7,87	0,05	0,67	0,13
2	0-10	7.5YR2.5/	1,73	0,015	7,84	0,16	6,72	4,78
	10-30	10YR3/4	1,90	0,001	8,22	0,10	7,16	6,76
	30-50	10YR5/2	1,28	0,002	8,4	0,07	8,49	8,07
Système semi-intensif (SSI)								
3	0-10	10YR3/1	1,40	0,051	7,8	0,26	7,90	5,33
	10-30	10YR4/1	1,44	0,036	8,03	0,21	6,85	4,90
	30-50	10YR3/2	1,75	0,044	8,15	0,18	6,26	4,77
4	0-10	10YR2/6	0,99	0,030	8,04	0,31	6,42	1,63
	10-30	10YR2/6	0,93	0,034	8,16	0,20	4,70	1,36
	30-50	10YR2/6	1,94	0,002	8,12	0,26	4,70	0,57
Système Agroforestier (SA)								
5	0-10	10YR4/1	0,82	0,083	7,81	1,01	15,28	5,57
	10-30	10YR4/1	0,83	0,087	7,93	0,63	13,32	6,83
	30-50	10YR4/1	0,84	0,069	8,01	0,35	10,97	7,33
6	0-10	10YR3/4	1,52	0,025	7,98	0,28	9,89	7,23
	10-30	10YR3/4	1,49	0,044	8,06	0,24	9,12	7,53
	30-50	10YR4/3	1,24	0,051	7,97	0,25	9,32	7,86
Système de Jachère permanente (SSU)								
7	0-10	10YR5/1	0,96	0,035	7,97	0,33	4,51	0,43
	10-30	10YR6/1	1,17	0,042	7,92	0,21	3,71	0,34
	30-50	10YR5/1	1,13	0,070	8,11	0,15	4,37	2,51
8	0-10	10YR3/1	1,53	0,040	7,14	0,14	2,30	0,10
	10-30	10YR3/1	1,83	0,005	7	0,11	1,66	0,09
	30-50	10YR4/3	1,74	0,008	7,42	0,08	1,20	0,06

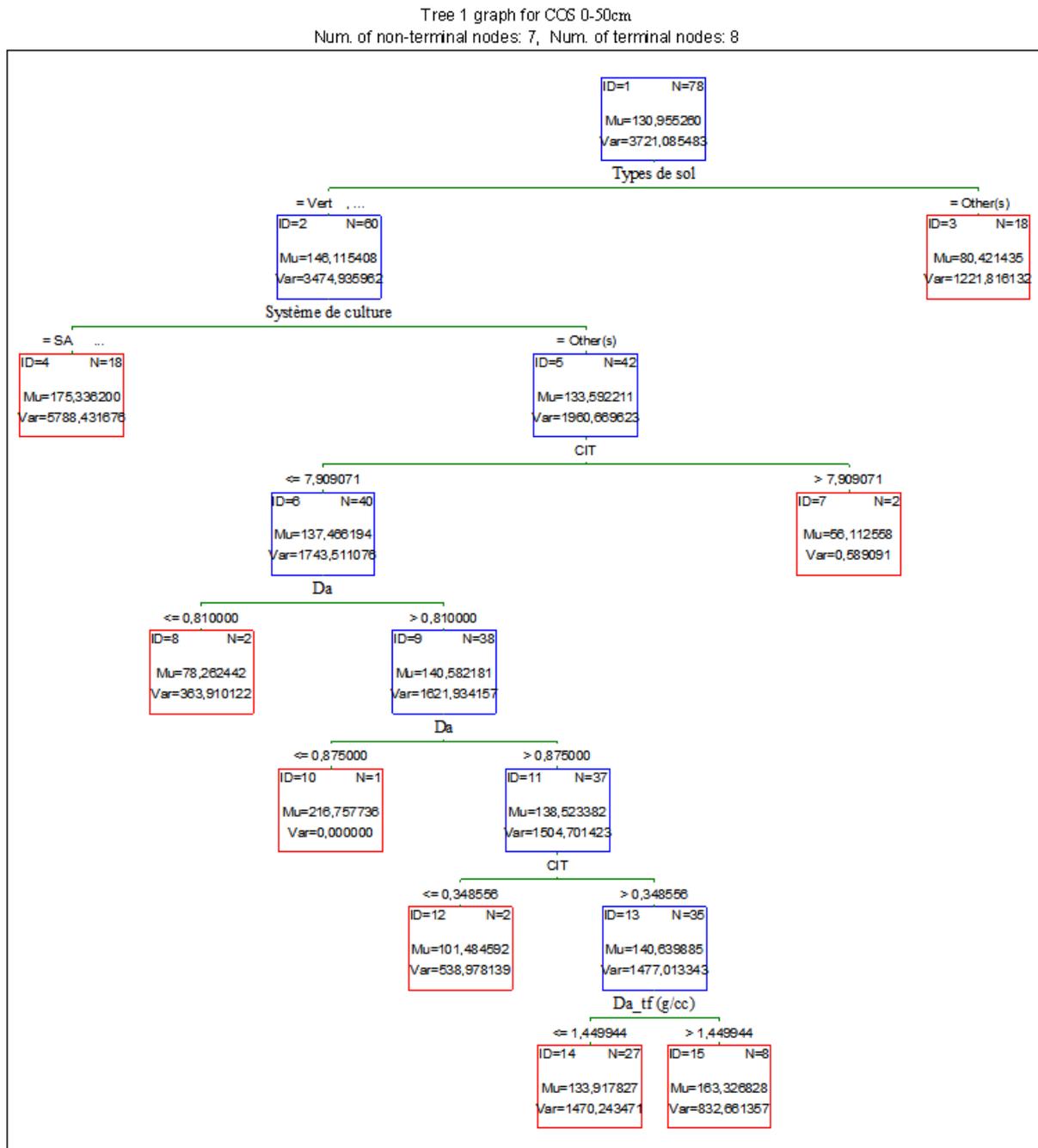
F : Vue du Kit CHN au labo de l'IRD-Eco&Sols



G : Analyse d'Arbres de Classification et de Régression (C&RT) pour la prédiction des Stocks de COS à Saint-Raphaël dans la couche 0-50 cm par

À l'issue des modèles d'équation logarithmique suggérées pour l'analyse de la variabilité verticale des concentrations en COT et en Nt à Saint-Raphaël, un modèle d'arbre de classification et de régression a été testé. L'analyse discriminante avait estimé différentes combinaisons linéaires des variables prédictives (Système de culture, Types de sol, Topographie). Au lieu des équations linéaires, l'arbre de classification et de régression a déterminé un ensemble de conditions logiques permettant de prévoir ou classifier les observations. Après analyse, l'arbre de régression et de classification montre que le type de sol qui prédit mieux le stockage de COS est le Vertisol (Nœud 2) positionné dans le plateau et soumis aux systèmes SI et SSI (Nœud 3). Outre cela, l'arbre prédit que l'ampleur de variation du stockage de COS dépendra également d'une concentration en CIT $< 7,90 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ (Nœud 5). La densité apparente doit être sans doute supérieure à $0,875 \text{ g cm}^{-3}$ (N6) et ne doit pas excéder $1,44 \text{ g cm}^{-3}$. En revanche, une teneur en CIT totale supérieure à $0,35 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ est recommandée dans les sols pour un meilleur stockage de COS. Toutefois cette concentration en CIT ne doit pas excéder $7,9 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$. Nous avons remarqué que l'analyse CR&T retient les Vertisols. Du coup elle rejette les RELEC soumis au SA et présentant la plus forte concentration en COS. Il apparaît qu'ils sont plus homogènes.

Cela revient à dire que les données sur les Vertisols sont les plus cohérentes pour pouvoir éventuellement prédire les stocks. L'analyse retient ensuite la concentration en CIT qui va jouer proportionnellement sur la Da. La topographie n'apparaît pas. On peut donc avancer qu'elle n'est pas discriminante parce qu'elle est tout simplement incluse dans la typologie des sols. Les variables qui prédisent mieux le stockage de carbone sont les types de sols, la Da, le CIT et la profondeur. Toutefois, cette dernière n'a pas été prise en compte dans cette analyse.



Vue de l'Arbre de Classification et de Régression (C&RT)

N.B : nous avons choisi d'introduire cette analyse en annexe en raison de la complexité d'interprétation de l'arbre de décision par beaucoup de chercheurs. Nous avons essayé d'apporter un ensemble d'éléments de réponse via cette analyse jugé très pertinent.

H : Vue du prélèvement des sols pour la mesure de la densité apparente par la méthode à l'eau.



I : Formation en fosse pédologique sur la description des sols et le prélèvement des sols pour la mesure de densité apparente.



J : Vue d'un Verstisol en jachère soumis en SSI à Bouyaha



K : Vue de du paysage de Mathurin : Versant (Est – Ouest) et Vallée



**L : Résumé à l'attention des décideurs et négociateurs (MARNDR, MDE, ONG, OCBs et Universités)
pour l'agriculture et l'environnement**



USAGES DES SOLS ET PRATIQUES AGRICOLES A SAINT-RAPHAËL

IMPACTS SUR LE CARBONE DES SOL

Résumé à l'attention des décideurs et négociateurs (MARNDR, MDE, ONG, OCBs et Universités) pour l'agriculture et l'environnement

Les éléments présentés sont issus de réflexions qui ont émergé lors de la réalisation d'un travail de collaboration lors du consortium constitué du Campus Henry Christophe de Limonade, l'IRD et Agrisud International. Le Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural (MARNDR), a commandité le « Programme de Recherche-Formation-Vulgarisation sur l'agriculture adaptée aux changements climatiques » à Saint-Raphaël. Ce grand chantier est réalisé à travers ce projet avec pour vocation « SOL pour la sécurité alimentaire et le climat en Haïti ».

Les sols : une ressource essentielle à préserver

Ils sont une ressource vitale pour la production végétale (aliments, fibres et biomasse) et la sécurité alimentaire.

Ils fournissent des services écosystémiques essentiels (filtration de l'eau, préservation de la biodiversité, stockage du carbone).

En tant que réservoirs essentiels de carbone de la croûte terrestre, ils ont un rôle primordial dans la lutte contre l'augmentation de la concentration en « gaz à effet de serre » (GES).

Ils sont au centre des objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies, notamment les ODD 2 « Faim zéro », 13 « Lutte contre les changements climatiques », 15 « Vie terrestre », 12 « Production et consommation Durable » et 1 « Pas de pauvreté ».

Définitions

Le carbone organique des sols est le résultat de la décomposition d'apports organiques, essentiellement des végétaux. On estime qu'il y a trois fois plus de carbone dans le sol que dans l'atmosphère.

Le stock de carbone du sol est la mesure d'un état, à un moment donné, pour une superficie et une profondeur donnée, exprimé en tonne de carbone par hectare.

Le stockage est un bilan faisant état des variations temporelles des stocks lors d'un changement d'usage ou de pratique agricole. Évaluer le stockage d'une pratique est alors l'évaluation du stockage de carbone additionnel par rapport à une pratique de référence.

LES SOLS DANS LE CONTEXTE HAÏTIEN, UNE RESSOURCE SOUVENT DEGRADEE ET SOUMISE A DES PRESSIONS ACCRUES

Données

Relief montagneux occupant 75% de l'espace, soit 20 000 des 27 750 km² du pays. Seulement 20% du territoire haïtien a des pentes inférieures à 10%, tandis que 63% du pays a des pentes supérieures à 20%. Environ 8 000 km² sont cultivables.

Population passant de 670 habitants au km² en 1987 à plus de 961 en 2013.

Les petits agriculteurs de subsistance représentent 50% de la population.

Diminution du couvert forestier : de 60% à moins de 2% au cours des six dernières décennies.

L'agriculture contribue à 25% du PIB haïtien.

Le nombre de saisons culturales est passé de trois à deux dans les agrosystèmes de plaine ou de plateau et, à une seule saison sur les versants. Les terres positionnées dans les périmètres irrigués sont surexploitées. Les surfaces en jachères ont régressé et leur surpâturage est de plus en plus fréquent.

- Haïti est soumis au changement climatique.
- Le climat fortement contrasté est une contrainte à la production intense de fibres et aliments sous régime pluvial.
- En règle générale les changements de carbone dans les sols montrent une décroissance suite à la déforestation.
- Les dégradations des sols sont causées essentiellement par la déforestation, le surpâturage, et les pratiques agricoles non appropriées.
- L'érosion des sols est manifeste lors de la déforestation. Les mécanismes sont accélérés lors d'usages de sols avec des pentes modérées à fortes (>8-10 %).
- Il est suspecté des pertes de biodiversité dans les sols suite à la déforestation.
- La compaction est avérée lors de surpâturage et trafic intense sous mécanisation.
- La contamination diffuse des sols et les pollutions sont observées au niveau des bas-fonds et zones humides de zones péri-urbaines.
- Les légumineuses sont en général sous-utilisées.

RECOMMANDATIONS GENERALES

Les recherches récentes montrent qu'un stockage accru de carbone dans le sol est possible bien que nuancé selon les pratiques agricoles. Il n'existe pas de solution unique pour restaurer les sols, préserver leurs stocks de carbone voire les augmenter.

Il existe des pratiques qui sont conservatoires du carbone et des sols et sont d'un faible impact environnemental, c'est le cas des pratiques agroécologiques.

Les recommandations suivent quatre piliers. Certaines de ces recommandations ont également un écho tant à l'échelle nationale qu'internationale :

- **Poursuivre la collecte de données et connaissances sur les pratiques agricoles et les stocks de carbone ;**
- **Soutenir la recherche, la formation et le dialogue matière de stockage de carbone des sols en Haïti ;**
- **Fournir un cadre politique favorable à la mise en œuvre de pratiques durables ;**
- **Assurer le financement pour soutenir les projets de recherche-développement mis en œuvre.**

Quelques recommandations faites par la FAO et le Groupe Technique Intergouvernemental des sols www.fao.org/publications :

Actions individuelles et du secteur privé : l'action des individus qui utilisent le sol où le gèrent doivent s'assurer que l'exploitation de cette ressource soit conduite de manière soutenable.

Actions de groupes et de la communauté scientifique : diffuser l'information et la connaissance sur les sols ; souligner l'importance de bonnes gestions (soutenables et conservatrices des sols) pour éviter des dommages aux fonctions clés des sols.

Actions publiques : promouvoir la gestion soutenable du sol selon leur diversité et les besoins des territoires ; créer les conditions socio-économiques et institutionnelles (levées d'obstacle, occupation des terres, droits et devoirs, accès aux financements, formation) ; développement d'actions à divers niveaux d'éducation et de formation ; appuyer les projets de recherche qui apportent un solide appui à la gestion des sols ; incorporer les principes et pratiques de gestion soutenable des sols à différents niveaux ; maintenir la biodiversité ; développer et maintenir les systèmes d'informations sur les sols.

DETAIL DES RECOMMANDATIONS

CONNAISSANCES ET DONNEES

- Caractériser l'ensemble de la diversité des systèmes de production et inventorier les pratiques et leurs impacts sur le carbone, positifs ou négatifs (bilans de carbone), afin de mieux conseiller les politiques publiques.
- Caractériser les compartiments d'entrée du carbone dans le sol des principales productions haïtiennes.
- Mettre en place des actions de métrologie des systèmes de production (productivité, intrants, temps et coûts de travail etc.).
- Documenter les effets sur les sols et le carbone des plantations à vocation exportatrice.
- Poursuivre l'harmonisation des méthodes de mesure et des données.
- Mettre en place et pérenniser des sites observatoires à moyen-long terme.
- Poursuivre l'organisation des bases de données géoréférencées.
- Remettre en fonctionnement les stations de collecte de données climatiques.

Le travail conduit a montré la nécessité de créer des référentiels, sur le carbone des sols, mais aussi sur la connaissance des systèmes de production qui sont en pleine évolution.

La place que le sol a selon la perception des agriculteurs doit être prise en compte, et sera sans doute un levier efficace pour une évolution des pratiques, leur développement et leur acceptation.

Les stocks de carbone organique des sols sous végétation naturelle n'ont pas pu être évalués, ils sont sans doute élevés. La connaissance montre qu'ils varient rapidement et fortement après la défriche et la mise en culture. La fragilité des systèmes sol-plante dès lors que l'on défriche est attestée. Nous avons vu en particulier que les phénomènes sont rapides, tant sur la réactivité à constituer des stocks de carbone exemplaires avec certaines pratiques, qu'à les voir se dégrader dans certains systèmes très intensifs.

Si l'impact des pratiques à forts intrants se traduit par des niveaux assez bas de stocks organiques (SOC) les pratiques à faible impact présentent un intérêt environnemental et agronomique certain en raison d'une meilleure séquestration de C et d'une meilleure productivité agricole.

En effet, des travaux complémentaires doivent être menés sur le compartiment d'entrée du carbone dans le sol car les quantités de biomasse aérienne et surtout racinaire des cultures locales restent inconnues. De même, la qualité et la quantité des apports exogènes doivent être étudiées afin d'évaluer la durabilité et les potentielles contre-indications liées à leurs usages.

RECHERCHE

- Imposer la mesure des stocks de carbone des sols jusqu'à au moins 1 m de profondeur lorsque des évaluations à moyen long terme sont recherchées.
- Évaluer la nature des compartiments du carbone organique des sols.
- Évaluer le rôle du carbone inorganique dans la stabilisation du carbone organique.
- Mieux évaluer la réserve minérale des sols associée aux compartiments de la matière organique des sols.
- Faire un effort pour pérenniser un laboratoire régional de référence en analyses de sols (le laboratoire des sols du Campus de Limonade en est un exemple), associé à la recherche et la formation.
- Étendre les inventaires/cartographies 1:50.000^{ème} des sols.
- Débuter la quantification des GES à l'échelle des exploitations agricoles.
- Poursuivre des mesures de données géochimiques pour l'évaluation de l'érosion des sols (¹³⁷Cs).
- Soutenir la recherche pour les caractérisations et productions de données, y compris en appuyant la formation des personnels techniques.
- Encourager les démarches participatives et les liens entre théorie, pratique et acteurs (chercheurs, organisations non-gouvernementales, conseillers agricoles et agriculteurs).

La connaissance des stocks de carbone des sols et leur dynamique s'inscrit dans un système socio-environnemental complexe, mobilisant différents types d'acteurs. Il est important de poursuivre la mesure de stocks dans les systèmes agricoles afin d'affiner la variabilité, le devenir des stocks dans des situations diachroniques bien géoréférencées, et ainsi également obtenir des résultats pour incrémenter la validation des modèles de simulation et spatialisation à court et moyen terme.

L'étude de l'évolution des stocks après mise en culture, et les simulations, permettent d'avoir une vision simplifiée du réel. Les simulations obtenues sont corrélées aux stocks mesurés sur le terrain, mais elles restent sous-estimées dans le cas des pratiques à faible impact ou surestimées pour les pratiques à forts intrants. Ainsi nous pouvons approcher le devenir des stocks en fonction des systèmes de production mais les données sur ces systèmes restent à affiner, notamment les apports du compartiment d'entrée du carbone.

Des données sur la nature des apports de matière exogène tant en qualité qu'en quantité pourraient permettre un travail sur le cœur même du modèle pour mieux correspondre aux réalités du terrain. Ainsi, pour le moment les extrapolations que nous proposons avec le seuil de risque comportent de grandes incertitudes. Des essais agronomiques, tenant compte des pratiques observées dans les systèmes, permettraient d'avoir un effet plus net de chacune d'elle sur le devenir du stock. Cette approche est en perpétuelle adaptation et est de plus en plus utilisée sous les tropiques avec de bons résultats pour les cultures annuelles intensives.

La mise en place d'exploitations pilotes permettraient aussi d'acquérir des données quantitatives intéressantes pour la réalisation de bilan GES. Ces stations pourraient servir de références pour les agriculteurs souhaitant réaliser une conversion. Ils mutualiseraient ainsi leurs connaissances sur les nombreux essais (variétés, densité, rotations, amendements).

PROCESSUS POLITIQUE

- Concevoir des politiques d'attribution foncière qui considèrent la multifonctionnalité des sols afin de les protéger et d'en optimiser l'usage.
- Dans tout projet d'extension des surfaces agricoles les concevoir avec une vision systémique (transport-transformation-commercialisation-développement durable).
- Mettre en place des leviers de financement efficaces et souples accompagnant des pratiques à faible impact environnemental.
- Les infrastructures et les formations nécessaires à l'agriculture sont à soutenir et développer.
- Expérimenter avec les agriculteurs des cultures « énergie-biomasse » et bois d'œuvre pertinents et intégrés aux systèmes de production.
- Conserver les résidus végétaux en surface du sol.
- Favoriser l'utilisation des légumineuses (alimentaires et productrices de fibres et alimentation animale).
- Peu à peu instruire des politiques pour la résorption des feux.

Les critères pédologiques doivent être bien pris en compte dans la politique d'attribution foncière ; en effet les travaux de recherche montrent que les stocks organiques sont sensibles à la déforestation ; les restitutions au départ permettent de limiter les problèmes érosifs et tamponnent la décrue du stock du sol.

L'accès au crédit pour la mise en place de pratiques, doit récompenser les investissements et le travail des agriculteurs ; en particulier sur les pratiques soutenables et les transitions agroécologiques.

C'est avec un ensemble de disciplines scientifiques et d'acteurs de terrain que l'on pourra avoir des réponses à des questions sur les différentes possibilités et modalités de stockage du carbone dans les sols, leur quantification, les risques éventuels et les co-bénéfices qu'ils procurent. Les réponses à ces questions peuvent être variables, les spécificités du territoire sont nombreuses et variées. Il est ainsi essentiel d'adapter le discours simple de compromis entre bénéfices climatiques et bénéfices agronomiques du stockage de carbone dans les sols du territoire, mais aussi s'en donner les moyens !

Références

Dorvil W. 2024. La gestion durable des sols pour stocker du carbone et limiter le changement climatique en Haïti : les mécanismes, les systèmes de production et pratiques agricoles. Thèse de Doctorat, Université d'État d'Haïti.

Dorvil W., 2023. 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, Haïti, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 19 p. [DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i4.28>]

DORVIL W., MUSEAU H., ANDRÉ D., SALOMON D., THÉODAT J.-M. 2024. Le statut organique des sols à Saint-Raphaël : quels mécanismes, quelles pratiques agricoles et quels indicateurs. *IJBCS*. pp. 2490-2510. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i6.28>

Dorvil W., 2024. 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, pp. 43-58. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2023/11/EGS_2024_31_Dorvil-et-al_43-58.pdf

FAO and ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy. www.fao.org/publications

Gardi C., M. Angelini, S. Barceló, et al., 2014, *Atlas de Suelos de América Latina y el Caribe*, Luxembourg, Comisión Europea. <https://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/7e06def6-10cf-4c8f-90f4-b981f410ef68>

Initiative 4 %o : <http://4p1000.org/>

Contact :

Campus Henry Christophe de Limonade, Prof. W. Dorvil dorwelyo4@yahoo.fr ; hmuseau@agrisud.org

IRD, Unité Mixte de Recherche Eco&Sols <http://www.umr-ecosols.fr/> ; cathy.clermont@ird.fr ; jean-luc.chotte@ird.fr

Réalisé avec le soutien de

