



HAL
open science

Synthèse biophysique sur le stockage de carbone dans les sols en Martinique

Julien Demenois, Alain Albrecht, Vincent Blanfort, Jean- Marc Blazy, Kenji Fujisaki, Angel Avadi, Laëtitia Bréchet, Michel Brossard, Benoît Burban, Tiphaine Chevallier, et al.

► **To cite this version:**

Julien Demenois, Alain Albrecht, Vincent Blanfort, Jean- Marc Blazy, Kenji Fujisaki, et al.. Synthèse biophysique sur le stockage de carbone dans les sols en Martinique. CIRAD, IRD, INRAE. 2023. hal-04130092

HAL Id: hal-04130092

<https://hal.inrae.fr/hal-04130092v1>

Submitted on 15 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RAPPORT
FINAL

mars 2023



STOCKER DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICILES ET FORESTIERS ULTRAMARINS



*Synthèse biophysique sur le stockage
de carbone dans les sols en Martinique*

Pilotes scientifiques de l'étude : Julien Demenois, Alain Albrecht, Vincent Blanfort, Jean-Marc Blazy

Experts scientifiques principaux : Kenji Fujisaki, Angel Avadi, Laëtitia Bréchet, Michel Brossard, Benoît Burban, Tiphaine Chevallier, Jean-Luc Chotte, Géraldine Derroire, Marc Dorel, Frédéric Feder, Paula Fernandes, Vincent Freycon, Antoine Richard, Jean-Christophe Roggy, Jorge Sierra, Clément Stahl, Emmanuel Tillard, Laurent Thuriès, Pierre Todoroff, Jonathan Vayssières, Antoine Versini, Mathieu Vigne

Relecteur du rapport :

Anne Heurtaux (consultante)

Coordination du projet : Julien Demenois

Contacts :

Julien Demenois : julien.demenois@cirad.fr

Alain Albrecht : alain.albrecht@ird.fr

Vincent Blanfort : vincent.blanfort@cirad.fr

Jean-Marc Blazy : jean-marc.blazy@inrae.fr

Le présent document constitue la version finale d'une partie de la synthèse technique et scientifique de l'étude sollicitée par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), convention n°2003C0034.

Citation de ce rapport :

FUJISAKI Kenji, DEMENOIS Julien, ALBRECHT Alain, BLANFORT Vincent, BLAZY Jean Marc, TESTE Adrien, AVADI Angel, BRECHET Laëtitia, BROSSARD Michel, BURBAN Benoit, CHEVALLIER Tiphaine, CHOTTE Jean-Luc, DERROIRE Géraldine, DOREL Marc, FEDER Frédéric, FERNANDES Paula, FREYCON Vincent, RICHARD Antoine, ROGGY Jean-Christophe, SIERRA Jorge, STAHL Clément, TILLARD Emmanuel, THURIES Laurent, TODOROFF Pierre, VAYSSIERES Jonathan, VERSINI Antoine, VIGNE Mathieu. 2023. Synthèse biophysique sur le stockage de carbone dans les sols en Martinique - version finale – mars 2023 – dans « 4 pour 1 000 » *Outre-mer : Stocker du carbone dans les sols agricoles et forestiers ultramarins : état des connaissances et synergies avec la Trajectoire 5.0 en Guadeloupe, en Martinique, en Guyane, à La Réunion, à Mayotte, à Saint-Martin et à Saint-Barthélemy*. ADEME, Cirad, INRAE, IRD, 38 p.

Cet ouvrage est disponible en ligne sur Agritrop : <https://agritrop.cirad.fr/>

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Objectifs de la synthèse	5
1.2	Principales sources de données mobilisées.....	5
2	Contexte biophysique de la Martinique	6
2.1	Situation géographique, topographie, géologie	6
2.2	Climat	7
2.3	Occupation et usage des sols	8
2.4	Typologie des sols	9
3	Quels sont les stocks de carbone du sol et quels en sont les principaux déterminants ? 13	
3.1	Source des données et méthodologie	13
3.2	Analyse globale des déterminants des stocks de COS	14
3.3	Stocks de COS selon le type de sol	15
3.4	Stocks de COS selon la teneur en argile.....	17
3.5	Stocks de COS selon l'usage du sol	19
3.6	Spatialisation des stocks de COS	23
3.6.1	Méthodologie	23
3.6.2	Carte des stocks de COS sur la couche 0-30 cm.....	23
3.6.3	Stocks de COS totaux à la Martinique	24
4	Effets des changements/maintien d'usage des sols sur les stocks de carbone du sol..	25
4.1	Forêt vers cultures pérennes et annuelles	25
4.2	Prairies vers cultures annuelles et pérennes.....	26
4.3	Cultures annuelles vers prairies	26
4.4	Cultures pérennes vers cultures annuelles	27
4.5	Changements d'usage actuels et futurs à la Martinique : quel effet sur les stocks de COS ?	27
5	Effets des changements/maintien des pratiques agricoles et forestières sur les stocks de carbone du sol	29
5.1	Pratiques de gestion dans les cultures pérennes	29
5.2	Pratiques de gestion dans les cultures annuelles.....	29
5.2.1	Mode d'intensification des systèmes maraîchers et vivriers	29
5.2.2	Travail du sol dans les cultures maraîchères	30

5.3	Pratiques de gestion actuelles et futures à la Martinique : quel effet sur les stocks de COS ?	31
6	Synthèse et perspectives	33
7	Bibliographie	34

1 Introduction

1.1 Objectifs de la synthèse

L'objectif de cette synthèse est de fournir un état des lieux des travaux réalisés sur le stockage de carbone organique des sols (COS) en Martinique. Compte tenu des données disponibles, les thématiques suivantes sont développées dans ce document, après avoir une présentation du contexte biophysique du territoire :

- Déterminants des stocks de COS et spatialisation des stocks de COS ;
- Effet des changements d'usage des sols sur les stocks de COS ;
- Effet des changements de pratiques de gestion des sols sur les stocks de COS.

1.2 Principales sources de données mobilisées

La plupart des sources de données mobilisées dans ce document proviennent d'un travail de synthèse régionale réalisé au cours d'un programme GESSOL (Blanchart and Bernoux, 2005 ; Venkatapen, 2012) intitulé « Déterminants des stocks de carbone des sols des Petites Antilles (Martinique, Guadeloupe). Alternatives de séquestration du carbone et spatialisation des stocks actuels et simulés ». D'autres sources de données viennent compléter ces travaux, issues d'études réalisées à l'échelle de la parcelle.

2 Contexte biophysique de la Martinique

2.1 Situation géographique, topographie, géologie

La Martinique est une île volcanique ayant une position centrale dans l'Arc des Petites Antilles, entre la Dominique au nord et Sainte-Lucie au sud. Sa superficie est de 1128 km². Deux régions peuvent être distinguées par leur relief : le nord de l'île est montagneux, avec des sommets volcaniques dépassant les 1000 m (la Montagne Pelée est le point culminant avec 1397 m), tandis que le sud de l'île est moins accidenté (Figure 1).

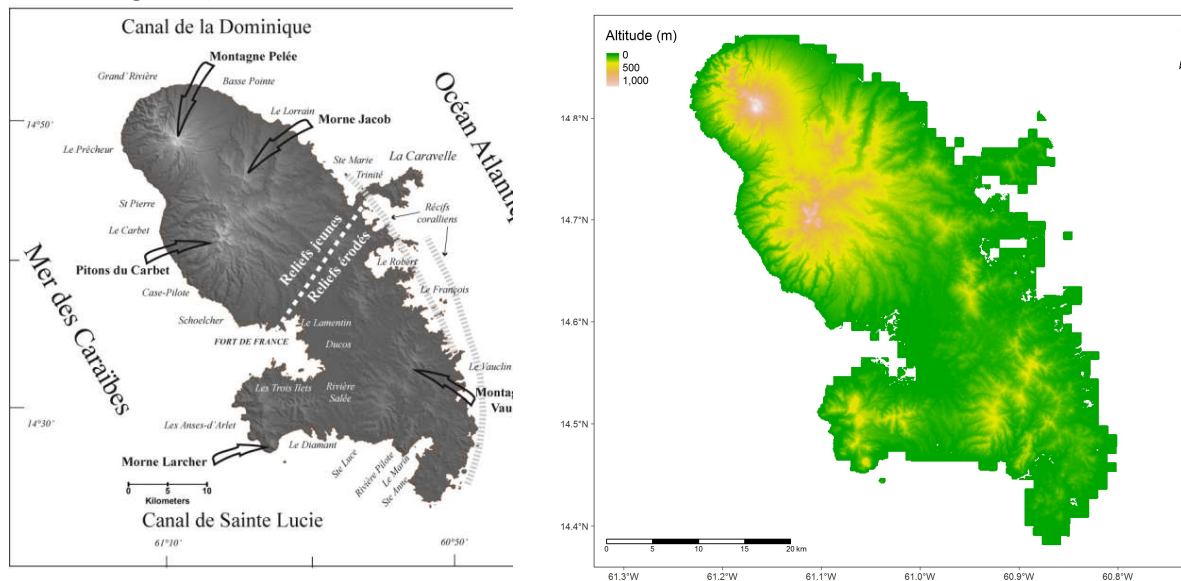


Figure 1. Topographie de la Martinique. Encart de gauche *in* Germa (2012) ; encart de droite : carte réalisée à partir de la BD Alti de l'IGN (75 m de résolution)

La géologie de la Martinique est exclusivement volcanique, avec les ensembles volcaniques les plus âgés dans le sud de l'île (entre 24 et 6,5 millions d'années), tandis que le volcanisme du nord de l'île est plus récent, avec un type de volcanisme qui a évolué dans le temps (Figure 2). Le volcanisme du Morne Jacob, au centre de l'île, était de nature effusive, tandis la Montagne Pelée est un volcan actif de type explosif. La majorité des roches sont de nature andésitique et acide, caractéristique du volcanisme de subduction. On retrouve néanmoins des ensembles basaltiques dans les séries les plus anciennes, localisées sur la presqu'île de la Caravelle et dans la région de Sainte-Anne dans le sud de l'île.

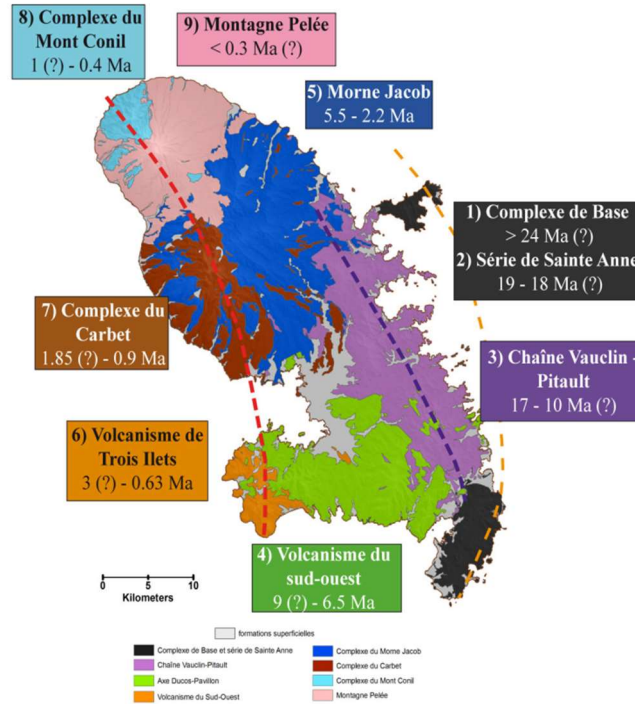


Figure 2. Carte des ensembles volcaniques de la Martinique et leurs âges en millions d'années (in Germa, 2009, modifié d'après la carte géologique de Westercamp et al., 1989).

Les points d'interrogation indiquent les incertitudes sur les âges des formations. Les arcs volcaniques sont représentés en pointillés.

2.2 Climat

Le climat à la Martinique est tropical, avec des températures moyennes mensuelles comprises entre 25°C et 28°C. Les précipitations annuelles sont comprises entre 1000 et 6000 mm, avec une distribution qui dépend du relief et de l'exposition aux vents dominants (Figure 3). Le nord de l'île, montagneux, est très arrosé, en particulier les reliefs les plus hauts, tandis que le sud de l'île est plus sec, avec des précipitations inférieures à 2000 mm. Une saison sèche et un peu plus fraîche entre janvier et mai se distingue d'une saison plus humide le reste de l'année.

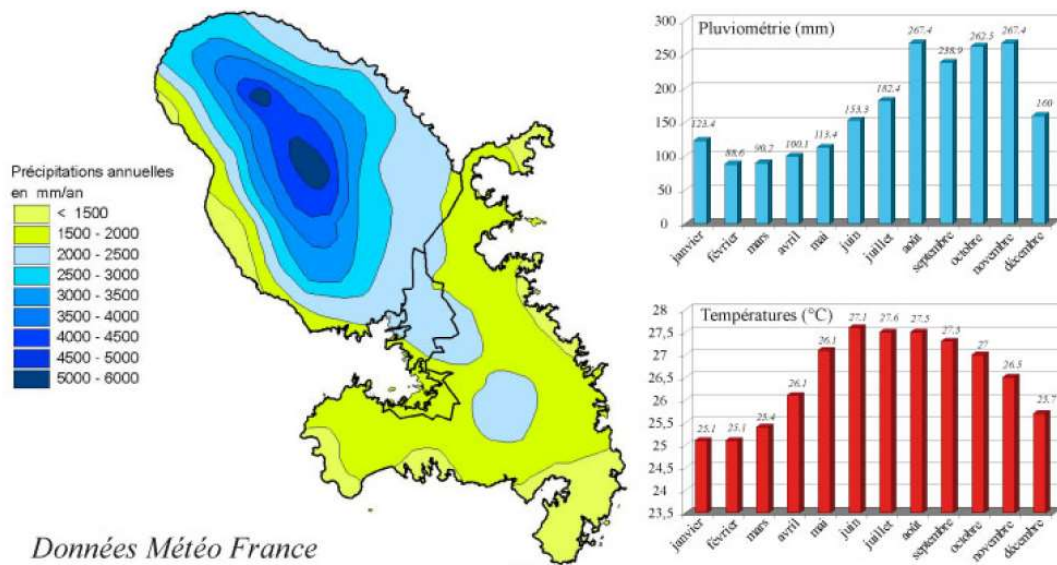


Figure 3. Répartition de la pluviosité et températures moyennes mensuelles à la Martinique (in Germa, 2009)

2.3 Occupation et usage des sols

Le biome dominant à la Martinique est la forêt, dont les formes varient selon l'altitude et le climat. La forêt est ainsi humide et dense dans les régions montagneuses d'altitude, tandis que la forêt sèche basse ou haute occupe le sud de l'île et les régions moins arrosées (Figure 4). Le sud de l'île est également occupé par des savanes sèches ou humides selon le climat (considérées comme des prairies sur la carte de la Figure 4).

Les surfaces agricoles représentent 26% du territoire en 2017 (Agreste, 2021). Les modes d'occupation des sols les plus représentés à la Martinique sont les prairies, les cultures pérennes de banane et canne à sucre, ainsi que les jachères rotationnelles (les plantes en rotation avec ces jachères ne sont pas spécifiées dans les statistiques Agreste) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Table 1. Répartition des usages des sols au sein des surfaces agricoles de la Martinique en 2013, 2017, et 2018 (source des données : Agreste Martinique, 2019)). Les régions les plus agricoles de la Martinique sont la façade atlantique au nord-est de l'île et le sud-ouest (Mantran et al., 2017). Les cultures industrielles de banane et canne sont principalement présentes sur la façade Atlantique et dans le centre de l'île, occupant les surfaces les plus propices à la mécanisation. Les prairies sont surtout présentes dans le sud, plus sec où donc les ressources hydriques pour l'irrigation sont plus limitées. Les cultures maraîchères et vivrières se retrouvent dans l'ensemble de l'île sur des petites surfaces.

La surface agricole				
(en ha)	2013 Surfaces	2017 Surfaces	2018 Surfaces	% évolution 2018/2013
Canne à sucre	4 001	3 915	3 840	-4,0
Cultures légumières	2 497	1 717	1 829	-26,8
Tubercules, racines et bulbes	677	440	526	-22,3
Légumes frais	1 820	1 277	1 303	-28,4
Cultures fruitières semi permanentes	6 449	5 055	4 431	-31,3
Banane	6 377	5 000	4 373	-31,4
Ananas	72	55	58	-19,4
Cultures fourragères	98	258	258	163,3
Jachères rotationnelles	2 042	2 332	3 676	80,0
Papam	24	24	24	0,0
Autres	11	34	34	209,1
Total terres arables	15 122	13 335	14 092	-6,8
Cultures fruitières permanentes	786	390	396	-49,6
Agrumes	351	203	203	-42,2
Autres fruits frais	435	187	193	-55,6
Surfaces toujours en herbe	8 224	7 919	8 581	4,3
Cultures florales	127	127	127	0,0
Surface Agricole Utilisée (SAU)	24 259	21 771	23 196	-4,4

Table 1. Répartition des usages des sols au sein des surfaces agricoles de la Martinique en 2013, 2017, et 2018 (source des données : Agreste Martinique, 2019)

Papam : Plantes à parfum, aromatiques et médicinales

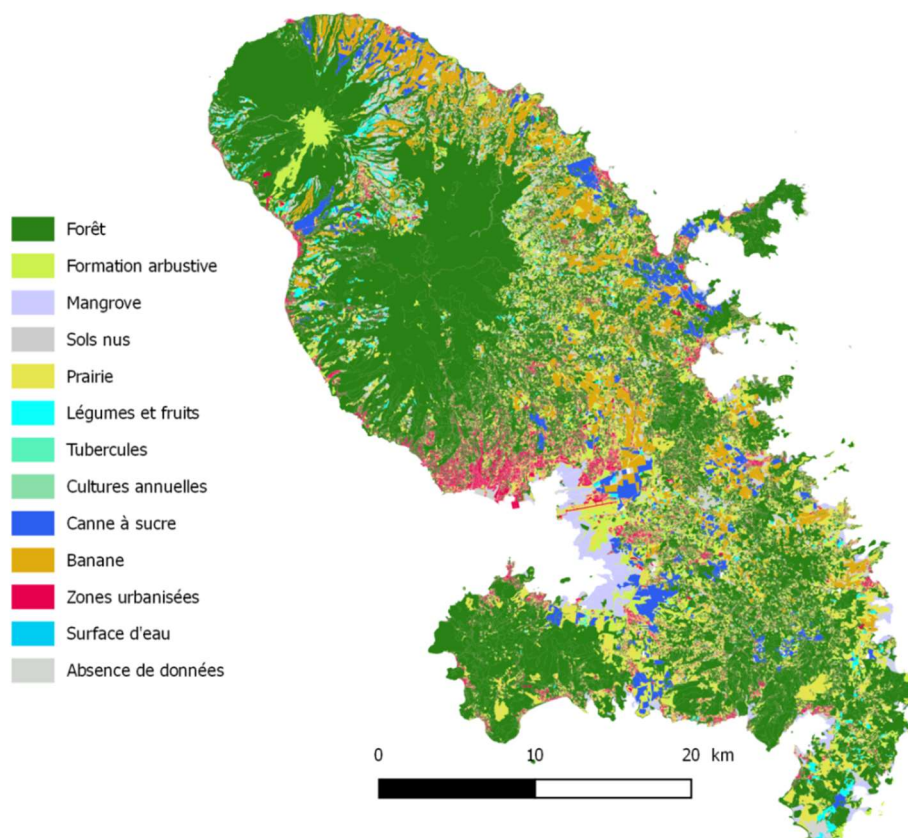


Figure 4. Carte des usages des sols à la Martinique en 2017. Carte réalisée à partir des données OCS GE (<https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/bb9f70bb57a2ef03bafdbd55d3cc0d8c5b957c8c>)

2.4 Typologie des sols

La distribution spatiale des sols à la Martinique résulte de la combinaison des conditions orographiques, climatiques, et géologiques rencontrées sur l'île. La quasi-totalité des sols de la Martinique sont développés à partir de roches volcaniques. L'âge des dépôts (et donc des sols) ainsi que la pluviosité, elle-même influencée par le relief de l'île, conditionnent l'intensité de l'altération et donc la formation des minéraux secondaires lors de la pédogénèse (Table 2).

	Sols jeunes (10^3 - 10^4 ans) Minéraux primaires sableux	Sols anciens (10^5 - 10^6 ans) Absence de minéraux primaires
Pluviosité < ETP (1300 - 1500 mm / an)	Sols vertiques à smectite	Vertisols à smectite
ETP < Pluviosité < ETP x 2	Sols brun-rouille à halloysite (Nitisols)	Sols rouges à montmorillonite
Pluviosité > ETP x 2	Andosols à allophane	Ferrisols (Ferralsols)

Table 2. Typologie des sols de la Martinique selon la pluviosité et l'âge des sols (adapté de Cabidoche et al., 2004).

La classification des sols utilisée est issue des travaux de cartographie des sols de Martinique (Colmet-Daage and Lagache, 1965). Les noms de sols entre parenthèses correspondent à la classification World Base Reference - WRB (IUSS Working Group WRB, 2015). « ETP » désigne l'évapotranspiration potentielle.

Les principaux types de sols rencontrés à la Martinique, cartographiés sur la Figure 5, sont ainsi les suivants :

- Les sols à allophanes couvrent le nord de l'île, où les matériaux volcaniques sont jeunes et issus du volcanisme de la Montagne Pelée, des Pitons du Carbet et du Morne Jacob, et où la pluviométrie est importante (> 2500 mm par an). Trois types de sols à allophanes ont été distingués par les pédologues (Colmet-Daage and Lagache, 1965) : les Andosols sur tuf, les Andosols sur cendres, et les sols jeunes. Les Andosols sur tuf présentent une granulométrie peu grossière, des taux élevés d'hydratation, et contiennent de la gibbsite ; ce sont les sols allophaniques les plus âgés de Martinique. Ils sont développés sur les roches volcaniques du Morne Jacob, dans le centre-nord de l'île. Les Andosols sur cendres (appelés dans certains travaux sols jeunes à allophanes) sont riches en éléments grossiers, mais aussi en allophanes, formés au sein de lits de cendres. Ces sols sont présents dans les plus hauts reliefs du nord de l'île (Montagne Pelée et Pitons du Carbet). Enfin, les sols jeunes (appelés dans certains travaux sols jeunes peu évolués sur cendres et ponces) présentent une texture grossière et couvrent les flancs de la Montagne Pelée au nord de l'île.
- Les sols brun-rouille à halloysite sont présents dans la moitié nord de l'île. Leur distribution forme une ceinture autour des ensembles volcaniques des Pitons du Carbet et du Morne Jacob, dans des zones où les précipitations annuelles sont comprises entre 1300 et 2500 mm. Ces sols sont relativement jeunes. Dans ces conditions climatiques, l'altération des cendres volcaniques produit de l'halloysite, un minéral argileux de type 1/1¹. L'horizon B de ces sols présente une structure polyédrique anguleuse avec des revêtements luisants. Ces sols peuvent être qualifiés de Nitisols dans la classification WRB (IUSS Working Group WRB, 2015).
- Les Ferrisols sont présents sur une bande de direction nord-sud entre Sainte-Marie et Rivière-Pilote. Ces sols se sont développés sur des formations volcaniques anciennes, dans des zones où la pluviosité est comprise entre 1600 et 2300 mm. L'horizon A de ces sols contient entre 30 et 40% d'argile, de type 1/1 (kaolinite ou halloysite). Ces sols sont compacts et peu poreux. Les Ferrisols peuvent être assimilés aux Ferralsols dans la classification WRB.
- Les Vertisols et sols vertiques occupent le sud de l'île, où les précipitations ne dépassent pas les 1300 mm et où la saison sèche est marquée. Ils sont riches en argile 2/1¹, la montmorillonite. La teneur en argile de ces sols varie entre 40 et 80 %. Les Vertisols de la Martinique sont magnésio-sodiques ; les teneurs en magnésium et sodium échangeable dépendent des constituants des matériaux parentaux.
- Les sols rouges à montmorillonite sont des sols dont le développement pédogénétique est intermédiaire entre celui des Ferrisols et des Vertisols. On les retrouve donc entre ces deux ensembles, principalement au niveau d'une bande nord-sud entre la presqu'île de la Caravelle et Sainte-Luce. La pluviosité annuelle y est comprise entre 1800 et 2200 mm. Ces sols se caractérisent par une couleur rouge vif en surface, et des teneurs en montmorillonite importantes qui augmentent avec la profondeur.
- Les sols à alluvions occupent les fonds de vallée et la plaine du Lamentin. Leurs caractéristiques dépendent du type de sol dont ils sont issus, on pourra donc y retrouver des sols vertiques, ferrisoliques, ou bien sableux.

¹ Les minéraux argileux ont une structure en feuillets ; les argiles de type 1/1 se caractérisent par des feuillets comprenant une couche octaédrique et une couche tétraédrique, tandis que les argiles de type 2/1 comprennent deux couches tétraédriques et une couche octaédrique.

La distribution de la minéralogie des sols de Martinique suit la logique de distribution des sols (Figure 6). Les allophanes se retrouvent au nord de l'île, parfois associés à la gibbsite dans le cas des Andosols sur tuf. Les zones à halloysite correspondent aux Nitisols. Les zones de kaolinite, meta-halloysite et oxyhydroxydes de fer correspondent aux Ferrisols. Les minéralogies complexes correspondent aux sols rouges à montmorillonite et à des intergrades entre Ferrisols et Ferrisols. Dans le sud de l'île, les Vertisols et sols vertiques sont dominés par la présence de smectites.

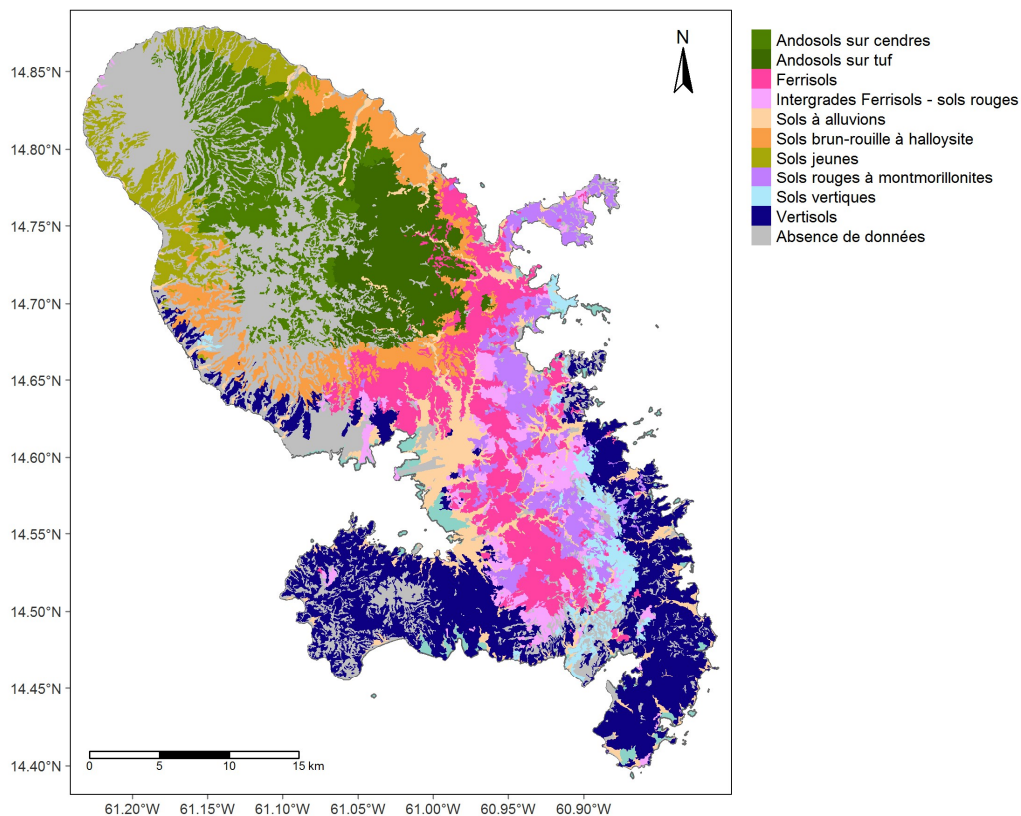


Figure 5. Carte des sols de la Martinique, d'après Colmet-Daage et al. (1969) ; numérisation des données par Blanchart et Bernoux (2005)

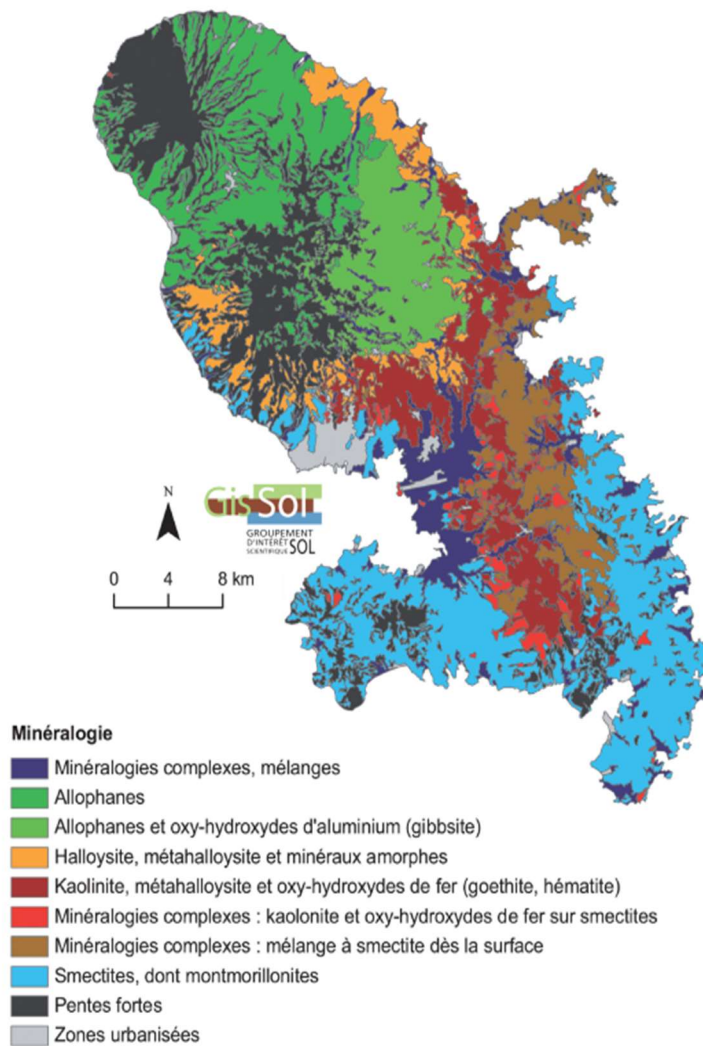


Figure 6. Minéralogie des sols de Martinique (source : IRD, Base de données Valsol de la Martinique à 1/20 000, d'après Colmet-Daage et al., 1969 ; Carte des sols des Antilles : Guadeloupe volcanique et Martinique au 1/20 000, Orstom Antilles, 2006. In Gis Sol, 2011)

3 Quels sont les stocks de carbone du sol et quels en sont les principaux déterminants ?

3.1 Source des données et méthodologie

Les déterminants des stocks de COS à la Martinique et leur spatialisation à l'échelle du territoire ont été synthétisés dans les années 2000, au cours du programme GESSOL (Blanchart et Bernoux, 2005) et de la thèse de C. Venkatapen (2012).

Ces travaux ont mobilisé plusieurs sources de données : analyses de sols issues de programmes de cartographie des sols (Colmet-Daage et al., 1969), analyses de sols issues de travaux de recherche, et analyses de sols spécifiquement réalisées au cours des travaux de Venkatapen (2012). Au total, 855 profils de sols ont été exploités durant ces travaux (Figure 7).

Étant donné la diversité des sources de données mobilisées lors de ces travaux de synthèse, Blanchart et Bernoux (2005) et Venkatapen (2012) ont eu recours à diverses méthodes pour harmoniser et homogénéiser les données permettant de calculer les stocks de COS pour chaque profil de sol et sur plusieurs couches de sol (0-10, 0-30, et 0-100 cm) :

- Sur certains profils de sol, la densité apparente n'avait pas été mesurée : des moyennes par type de sol ont été appliquées ;
- Sur certains profils échantillonnés dans les années 1960 (Colmet-Daage et al., 1969), seule la teneur en matière organique (MO) était renseignée : la teneur en COS a été obtenue en utilisant le rapport [Teneur en MO / Teneur en COS] = 1,724 (coefficient de Van Bemmelen) ;
- Des interpolations linéaires ont été réalisées lorsque les profondeurs d'échantillonnage ne correspondaient pas aux profondeurs de sols retenues dans les calculs.

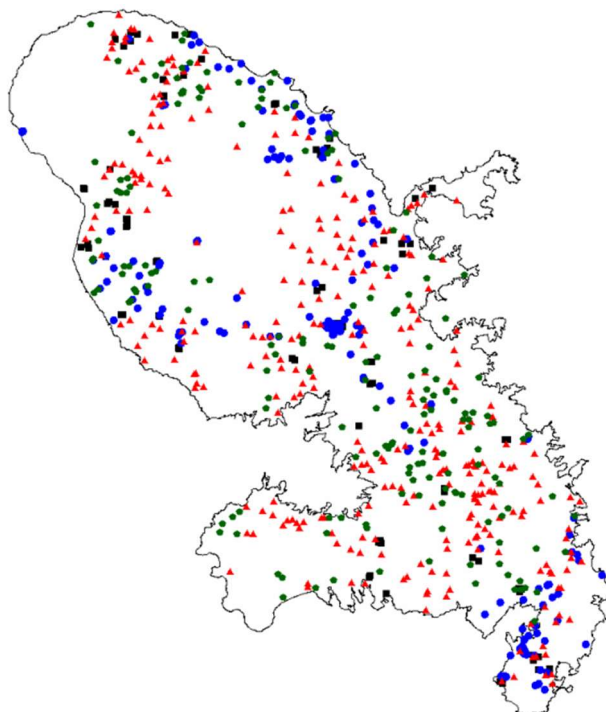


Figure 7. Localisation des profils utilisés pour l'analyse des déterminants et la spatialisation des stocks de COS à la Martinique. In Blanchart et Bernoux (2005).

En rouge : profils de sols issus des programmes de cartographie au 1/20 000^{ème} ; en vert : profils de sols étudiés par Colmet-Daage et al. (1970) ; en bleu : profils de sols issus de la littérature ; en noir : profils de sols étudiés lors de la thèse de Venkatapen (2012).

3.2 Analyse globale des déterminants des stocks de COS

Les principaux déterminants des stocks de COS mis en avant par les travaux de Blanchart et Bernoux (2005) et Venkatapen (2012) concernent les propriétés des sols (type de sol, granulométrie, type d'argile) et le mode d'usage des sols. La présente synthèse se focalise sur les stocks de COS dans la couche 0-30 cm. Les déterminants des stocks de COS testés sont d'ordre géologique, altimétrique, climatique, pédologique ainsi que le mode d'usages des sols

Les données rassemblées par Blanchart et Bernoux (2005) et Venkatapen (2012) ont été analysées de façon globale, afin de mettre en évidence l'effet des déterminants biophysiques sur les stocks de COS. Le jeu de données a été prétraité en conservant les points de prélèvements pour lesquels les stocks de COS sur 0-30 cm étaient disponibles. Les covariables suivantes ont été retenues : usage du sol, type de sol, et teneur en argile. A partir de la géolocalisation des profils, les variables climatiques suivantes ont été extraites en utilisant les données WorldClim à 1 km de résolution : température moyenne annuelle, pluviosité annuelle, ETP annuelle. L'altitude des points de prélèvements a été récupérée à partir des données IGN (BD Alti à 75 m de résolution). Enfin, l'âge des matériaux parentaux des sols a été extrait des données de la carte géologique au 1/50 000^{ème}.

Un modèle random forest a été construit afin d'analyser l'effet des variables sélectionnées sur les stocks de COS, en utilisant la fonction cforest du package party sur R.

La variance expliquée par le modèle est plutôt faible, avec un r^2 ajusté de 0,31. Une large part de la variabilité des stocks de COS n'est donc pas expliquée par les covariables disponibles dans le jeu de données (usage du sol, type de sol, et teneur en argile, mais aussi variables climatiques, altitude, et âge des roches).

Néanmoins, les variables qui expliquent le mieux la variabilité des stocks de COS sont la teneur en argile, l'usage du sol, et le type de sol (Figure 8). La faible importance relative des variables climatiques, de l'altitude, et de l'âge des roches, pourrait s'expliquer par le fait que ces variables contribuent déjà à la variabilité des types de sols rencontrés à la Martinique. La combinaison de ces variables influence l'intensité de l'altération qui est prise en compte pour qualifier et différencier les types de sols.

L'influence du type de sol, de la teneur en argile et de l'usage du sol est détaillée dans les sections suivantes. Ces trois déterminants avaient été identifiés et mis en avant par Blanchart et Bernoux (2005) et Venkatapen (2012) pour expliquer la variabilité des stocks de COS. Comme cela sera développé plus loin, la mesure de la teneur en argile des sols est difficile lorsque les sols contiennent des allophanes ; l'effet de la teneur en argile a donc surtout été retenu dans le cas des sols à argile 1/1 (sols brun-rouille, Ferrisols) et 2/1 (Vertisols, sols rouges à montmorillonite).

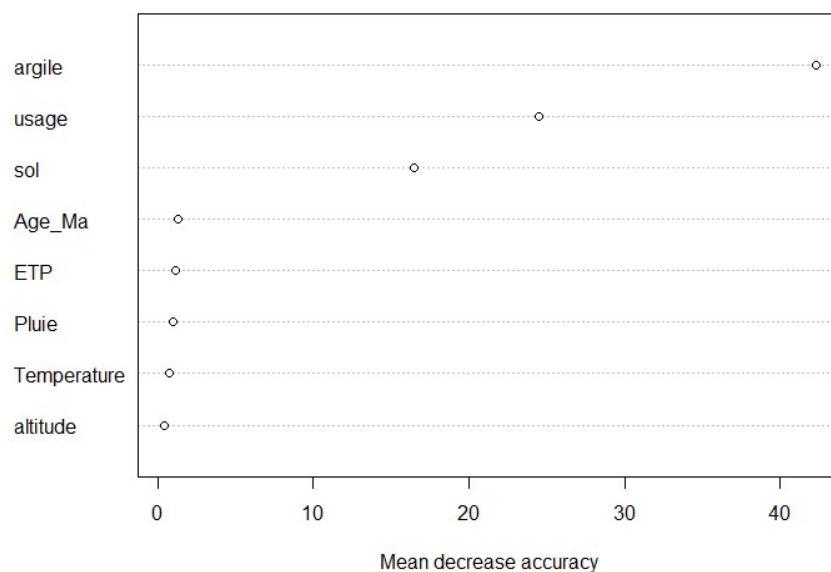


Figure 8. Importance des variables du modèle random forest de la variabilité des stocks de COS sur la couche 0-30 cm (source des données : Blanchart et Bernoux, 2005 ; Venkatapen, 2012)

Age_Ma : Age, en millions d'années, des matériaux parentaux du sol ; ETP : évapotranspiration potentielle.

3.3 Stocks de COS selon le type de sol

Les stocks de COS varient à la Martinique selon le type de sol, mais une hétérogénéité importante subsiste au sein de chaque type de sol (Figure 9).

Les stocks de COS les plus élevés sont rencontrés dans les Andosols, formés sur tuf et sur cendres (74 et 76 Mg COS ha⁻¹ respectivement), tandis que les stocks les plus faibles concernent les sols jeunes développés sur les dépôts volcaniques très récents, et les sols brun-rouille à halloysite (Figure 9 et Table 3 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Les sols rouges à montmorillonite sont les sols non allophaniques qui présentent les stocks de COS les plus importants avec 62 Mg ha⁻¹.

Les Ferrisols et Vertisols, principaux sols agricoles de l'île, présentent des valeurs intermédiaires, respectivement de 58 et 53 Mg ha⁻¹ en moyenne.

Cette variabilité des stocks de COS selon le type de sol s'explique par la minéralogie des sols.

Les Andosols sont riches en allophanes, qui contribuent à la stabilisation de la matière organique selon différents mécanismes dont la formation de complexes métal-humus-argiles (Boudot, 1992 ; Boudot et al., 1986 ; Huygens et al., 2005), des pH potentiellement acides et une forte teneur en eau avec une faible accessibilité aux micro-organismes des substrats organiques inclus au sein d'un réseau poral complexe constitué d'agrégats d'allophanes (Chevallier et al., 2010). De fortes corrélations ont été décrites entre stocks de carbone et teneur en allophane des Andosols (Allo, 2019 ; Chevallier et al., 2019).

Les sols brun-rouille (ou Nitisols) contiennent de l'halloysite, un minéral argileux de type 1/1 possédant de faibles capacités d'adsorption de la matière organique, contrairement aux argiles de type 2/1, ce qui explique les stocks de COS peu élevés rencontrés dans ces sols.

Les Ferrisols (ou Ferralsols), eux aussi riches en argiles de type 1/1, sont cependant plus riches en COS que les sols brun-rouille. Cette différence entre Nitisols et Ferralsols est difficilement explicable au vu des données disponibles.

Dans les sols à argiles 2/1, les stocks de COS plus faibles dans les sols vertiques et les Vertisols par rapport aux sols rouges à montmorillonite peuvent s'expliquer par la susceptibilité à l'érosion des Vertisols à la Martinique à la suite de leur mise en culture, en raison de leur richesse en Na et Mg

échangeables (Albrecht et al., 1992b ; Feller et al., 2001). Ces sols peuvent donc s'appauvrir en COS par érosion, contrairement aux sols rouges à montmorillonite et aux Ferrisols.

Enfin, les sols jeunes formés sur les dépôts volcaniques récents présentent des stocks de COS faibles en raison des faibles quantités de minéraux secondaires qu'ils contiennent, ce qui leur confère de faibles capacités d'adsorption et de stabilisation de la matière organique.

Les stocks de COS varient donc selon le type de sol, mais au sein de chaque type de sol il existe également une forte variabilité des stocks. Les coefficients de variation et écarts interquartiles mettent en évidence l'importante dispersion des stocks de COS dans les sols contenant des allophanes (écart interquartile entre 29 et 30 Mg COS ha⁻¹) et dans les Vertisols (écart interquartile de 25 Mg COS ha⁻¹). Dans le cas des sols contenant des allophanes, l'importante dispersion des données met en avant la difficulté à relier la typologie des sols volcaniques jeunes établie sur le terrain et les stocks de COS. Ces sols peuvent en effet contenir des quantités variables de phases minérales ayant des propriétés de stabilisation de la matière organique contrastées, comme cela a été montré dans les Andosols de La Réunion (Allo, 2019 ; Basile-Doelsch et al., 2005) et au Costa Rica (Chevallier et al., 2019). L'acquisition de données minéralogiques quantitatives à la Martinique pourrait donc permettre d'affiner la typologie des sols en lien avec leurs propriétés minéralogiques et les stocks de COS.

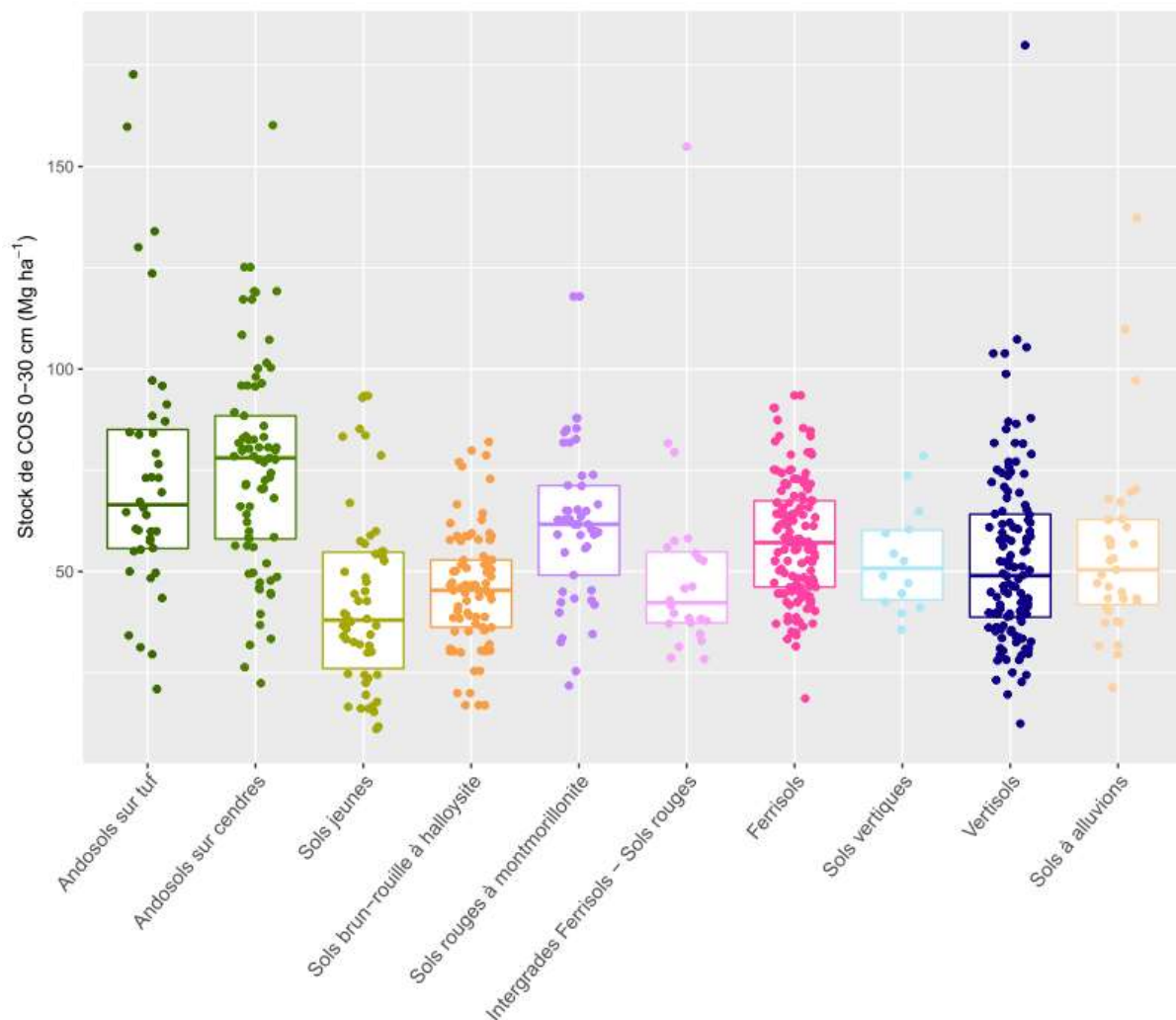


Figure 9. Distribution des stocks de COS dans la couche 0-30 cm selon le type de sols à la Martinique (source des données : Blanchart et Bernoux, 2005)

Type de sol	n ¹	Stocks de COS (Mg ha ⁻¹)				
		Moyenne ± écart-type	CV ¹	Médiane (1er, 3ème quartile)	El ¹	Min, Max
Sols jeunes	54	43 ^d ± 22	51	38 (26, 55)	29	11, 93
Andosols sur cendres	77	76 ^a ± 26	35	78 (58, 88)	30	22, 160
Andosols sur tuf	40	74 ^{ab} ± 33	45	66 (56, 85)	29	21, 73
Sols brun-rouille à halloysite	85	46 ^d ± 14	30	45 (36, 53)	17	17, 82
Ferrisols	141	58 ^c ± 15	26	57 (46, 68)	22	19, 93
Intergrades Ferrisols-Sols rouges	24	50 ^{cd} ± 26	52	42 (37, 55)	18	28, 155
Sols rouges à montmorillonite	49	62 ^{bc} ± 20	32	62 (49, 71)	22	22, 118
Sols vertiques	14	53 ^{cd} ± 13	25	51 (43, 60)	17	36, 79
Vertisols	122	53 ^{cd} ± 23	43	49 (39, 64)	25	12, 180
Sols à alluvions	35	55 ^{cd} ± 23	42	50 (42, 63)	21	21, 137

¹ n : nombre d'échantillons ; CV : coefficient de variation ; El : écart interquartile

Table 3. Statistiques descriptives des stocks de COS sur la couche 0-30 cm à la Martinique (source des données : Blanchart et Bernoux, 2005 ; Venkatapen, 2012).

Les lettres figurant en exposant correspondent aux groupes statistiques déterminés par Anova et test de Tukey au seuil $p < 0.05$.

3.4 Stocks de COS selon la teneur en argile

Il existe une relation faiblement positive entre les stocks de COS et la teneur en argile dans la couche 0-30 cm ($r=0.24$, $p < 0.05$) (Figure 10). Cependant cette relation semble peu évidente pour les sols avec une teneur en argile $< 50 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$. Cette même relation décomposée par type de sol met en évidence l'absence de relation positive entre teneur en argile et stocks de COS sur certains sols, tels que les sols brun-rouille à halloysite, les Ferrisols et les sols vertiques (Figure 811Figure 10). A l'inverse, il existe une relation positive et linéaire entre la teneur en argile et les stocks de COS pour les sols rouges à montmorillonite, les Vertisols et les sols à alluvions. La relation entre stocks de COS et teneur en argile ne serait donc valide que pour certains sols à argile 2/1 (sols rouges à montmorillonite et Vertisols). L'absence de relation entre stocks de COS et teneur en argile dans les sols à allophanes peut s'expliquer par les difficultés méthodologiques de la mesure de teneur en argile dans ces sols, difficiles à disperser et sujets à des changements de structure lorsqu'ils sont séchés en laboratoire (Bartoli and Burtin, 2007).

De nombreux travaux ont décrit les relations positives entre teneur en particules fines et teneur en COS, pour les sols à argile 2/1 et 1/1 (Feller and Beare, 1997 ; Fujisaki et al., 2018 ; Quesada et al., 2020 ; Zinn et al., 2007), qui sont expliquées par l'augmentation des capacités d'adsorption de la matière organique lorsque la teneur en argile ou particules fines augmente dans les sols. Cependant, des travaux récents ont montré que la teneur en argile ou particules fines n'avait pas d'effet sur les teneurs en COS à l'échelle régionale. A Porto-Rico et dans les Iles Vierges, Vaughan et al. (2019) ont également montré l'absence de relation entre teneur en argile et teneur en COS dans une population de sols variés (Ferralsols, Cambisols, Kastanozems, Vertisols, Stagnosols). Aux Etats-Unis, Rasmussen

et al. (2018) ont mis en évidence l'absence d'effet de la teneur en argile sur les teneurs en COS pour les sols des climats humides à subhumides : dans ces conditions, les teneurs en oxy-hydroxydes de Fe et Al expliquent mieux la variabilité des teneurs en COS. L'importance de ces oxy-hydroxydes de Fe et Al dans la stabilisation de la matière organique a également été mise en évidence dans les sols tropicaux à argile 1/1 (Barthès et al., 2008).

L'absence de ces covariables dans le jeu de données martiniquais analysé ici pourrait donc être un frein à la compréhension de la variabilité des stocks de COS dans les Ferrisols et les sols brun-rouille à halloysite. Notre analyse décrit la relation entre teneur en argile et stocks de COS, or les teneurs en COS et la densité apparente pourraient être affectées de manière différente par la teneur en argile ; si les teneurs en COS sont corrélées positivement à la teneur en argile, la densité apparente peut être corrélée négativement à la teneur en argile dans ces sols volcaniques, rendant difficile l'analyse de l'influence de la teneur en argile sur les stocks de COS. Les teneurs en argile dans la couche 0-30 cm n'étaient pas accessibles dans le jeu de données utilisé.

Cette analyse ne tient également pas compte de l'usage des sols, qui, comme cela est montré dans la section suivante, influence les stocks de COS.

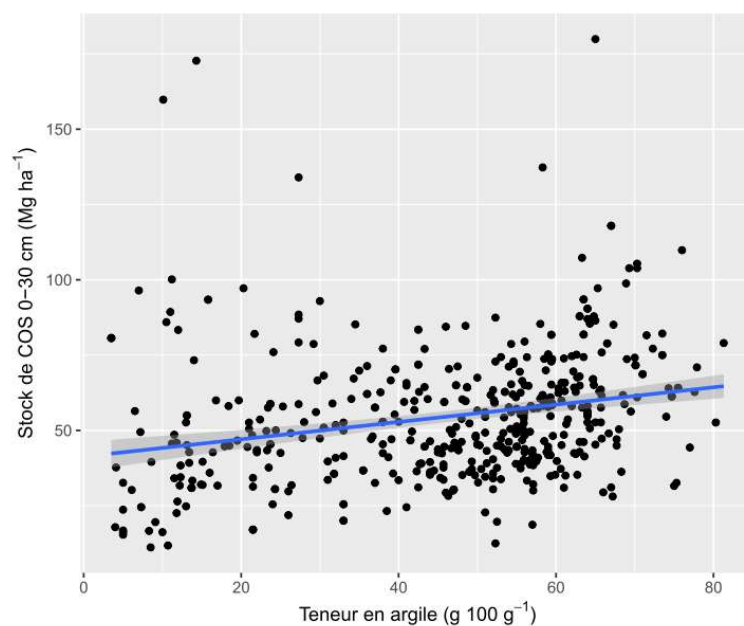


Figure 10. Stocks de COS dans la couche 0-30 cm en fonction de la teneur en argile du sol à la Martinique (source des données : Blanchart et Bernoux, 2005 ; Venkatapen, 2012)

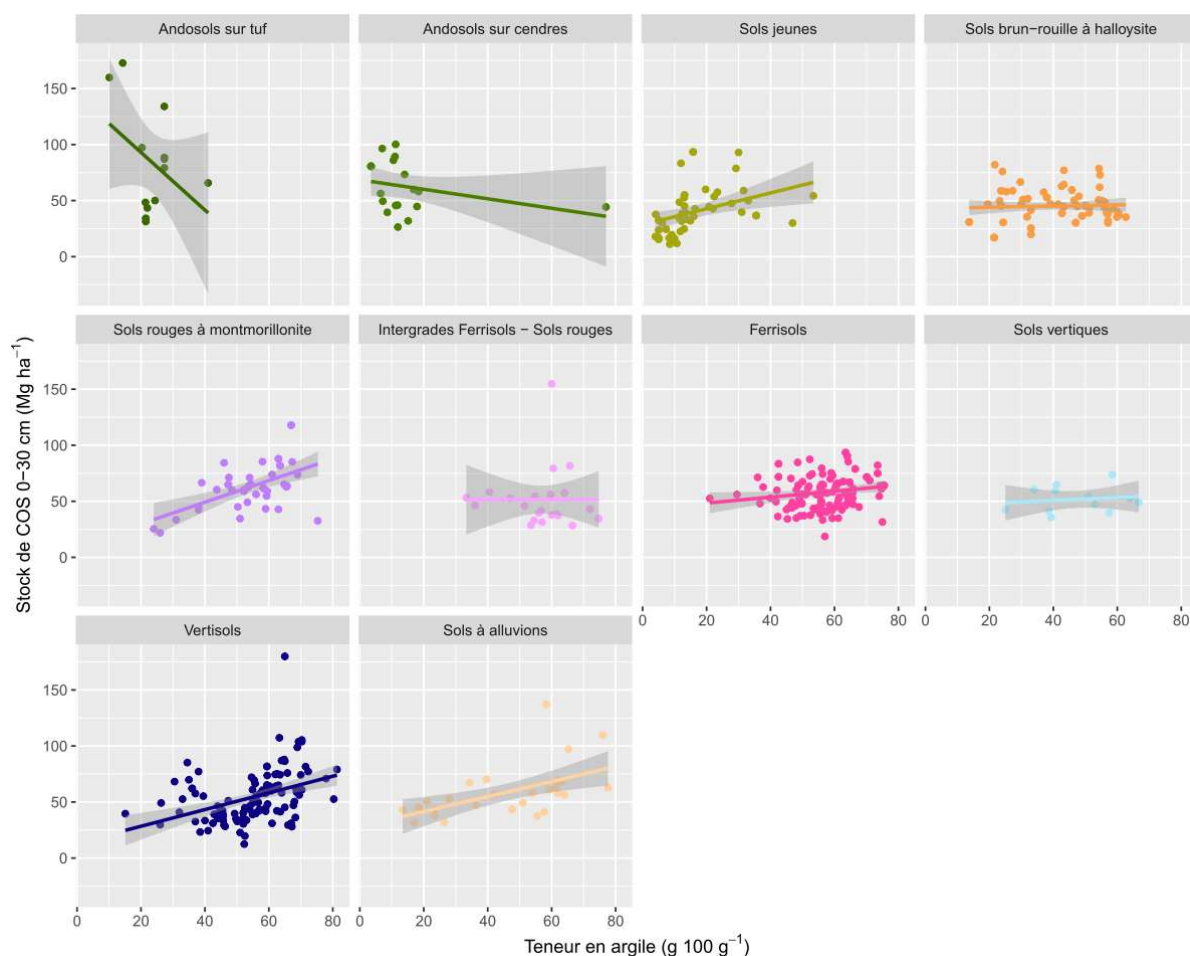


Figure 11. Stocks de COS dans la couche 0-30 cm en fonction de la teneur en argile du sol et selon le type de sol à la Martinique (source des données : Blanchart et Bernoux, 2005 ; Venkatapen, 2012)

Les teneurs en argile des Andosols ne reflètent probablement pas la distribution granulométrique du sol, les particules $<2 \mu\text{m}$ y seraient agrégées et constitueraient des pseudo-sables non dispersés au cours de l'analyse.

3.5. Stocks de COS selon l'usage du sol

A l'échelle du territoire, l'usage du sol a un effet sur les stocks de COS observés, malgré une forte dispersion des données (Figure 12 et Table 4). Les sols sous forêt se distinguent par les stocks de COS les plus élevés ($72,2 \pm 30,5 \text{ Mg COS ha}^{-1}$). Les stocks de COS les plus faibles se retrouvent dans les sols cultivés en maraîchage ($44,1 \pm 13,4 \text{ Mg ha}^{-1}$), qui font par ailleurs l'objet d'un travail du sol très fréquent, généralement avant chaque culture, soit plusieurs fois par an. Les prairies présentent des stocks non différents significativement de ceux sous forêt, mais plus élevés que ceux sous maraîchage. Les cultures de banane et canne, fortement représentées dans l'île, présentent des stocks intermédiaires, respectivement de $55,0 \pm 21,9$ et $56,4 \pm 23,7 \text{ Mg COS ha}^{-1}$. Sur ces deux dernières cultures, les travaux du sol avant la mise en place peuvent être très profonds (pouvant aller jusqu'à l'utilisation de tractopelles retournant les 80 premiers centimètres du sol), en partie compensés par de fortes restitutions de biomasse sur la parcelle pendant 4 à 5 ans en moyenne.

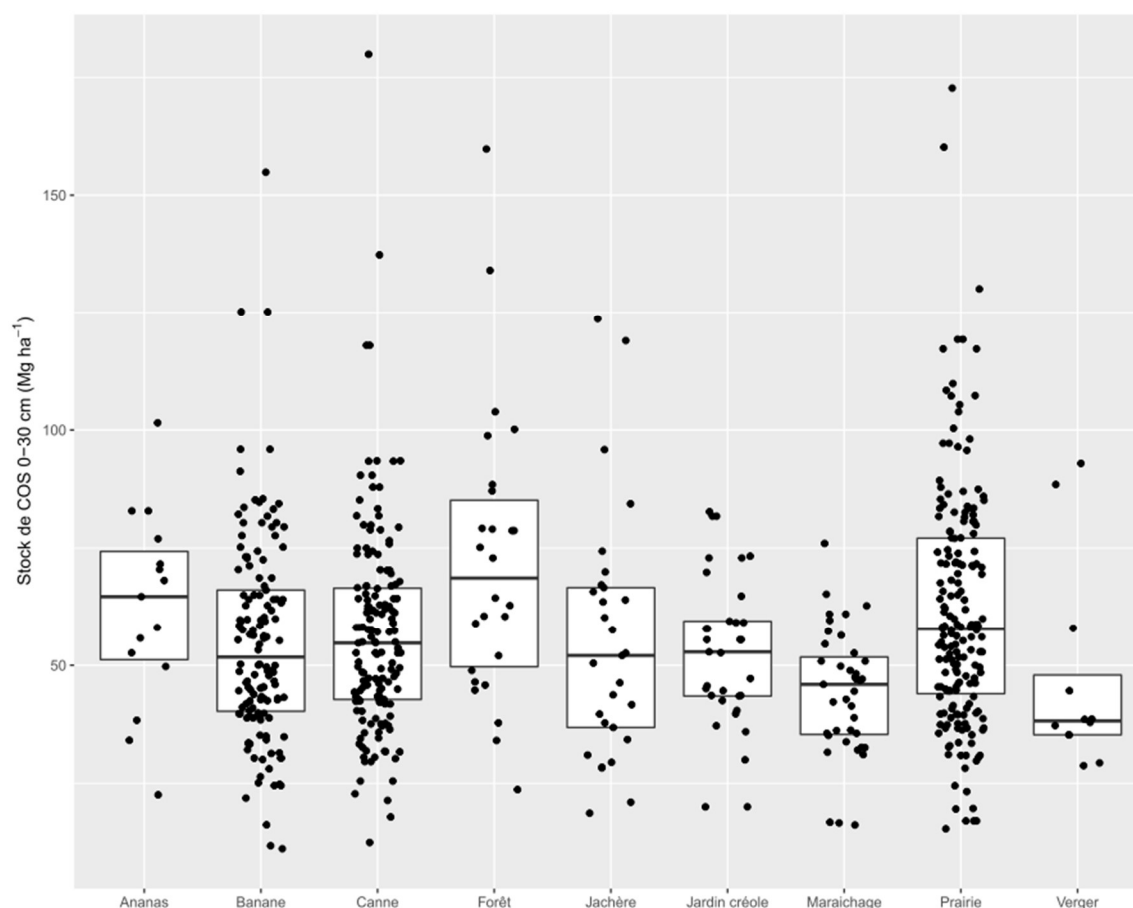


Figure 12. Distribution des stocks de COS selon l'usage des sols à la Martinique (source des données : Blanchart et Bernoux, 2005 ; Venkatapen, 2012)

Les boxplots représentent la médiane ainsi que les 1^{er} et 3^{ème} quartiles des données.

Usage	n	Stock de COS moyen ± écart-type
Forêt	26	72,2 ^a ± 30,5
Prairie	187	62,3 ^{ab} ± 21,7
Ananas	15	62,0 ^{abc} ± 20,8
Canne	160	56,4 ^{bc} ± 23,7
Jachère	29	55,3 ^{bc} ± 26,3
Banane	136	55,0 ^{bc} ± 21,9
Jardin créole	33	52,9 ^{bc} ± 16,3
Verger	12	47,1 ^{bc} ± 21,7
Maraîchage	39	44,1 ^c ± 13,4

Table 4. Stock de COS moyen selon l'usage des sols (source des données : Blanchart et Bernoux, 2005 ; Venkatapen, 2012)

n : nombre d'échantillons. Les lettres figurant en exposant correspondent aux groupes statistiques déterminés par analyse post-hoc au seuil 0,05 (Tukey).

Etant donné l'importance du type de sol sur les stocks de COS, il est pertinent d'analyser les stocks de COS en croisant usage du sol et type de sol. On constate cependant que pour certains types de sol, l'usage du sol a un effet non significatif sur les stocks de COS au seuil de $p=0,05$: c'est le cas des Andosols sur cendres, des Ferrisols, des sols à alluvions et des sols jeunes (Figure 13).

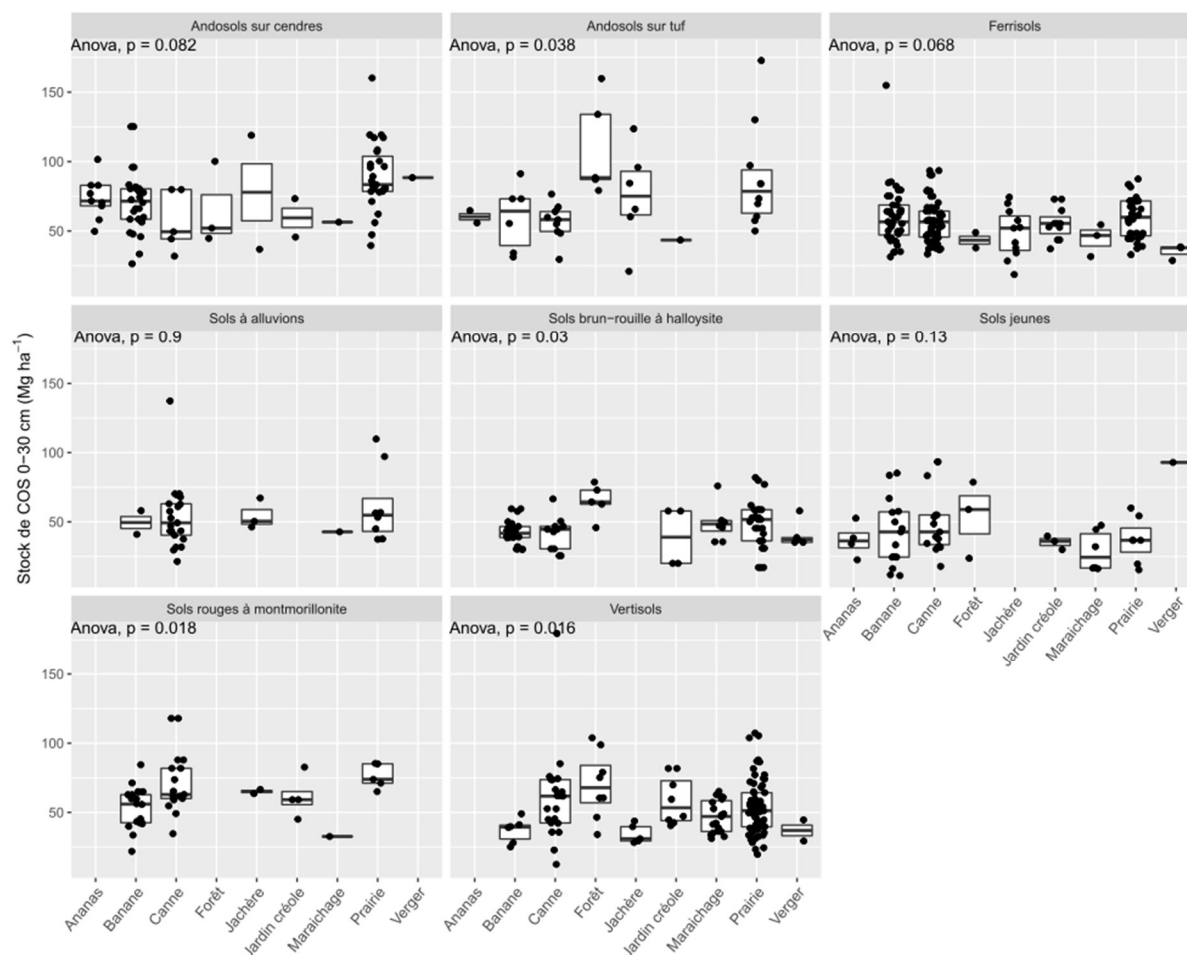


Figure 13. Stocks de COS selon l'usage et par grand type de sol à la Martinique (source des données : Blanchart et Bernoux, 2005 ; Venkatapen, 2012)

Pour cette figure, les sols vertiques ont été assimilés aux Vertisols, et les Intergrades Ferrisols/sols rouges aux Ferrisols.

En revanche, dans les Andosols sur tuf, les sols brun-rouille à halloysite, les sols rouges à montmorillonite et les Vertisols, l'usage du sol a un effet significatif sur les stocks de COS.

Des analyses de variance ont été conduites pour les sols concernés par un effet significatif de l'usage du sol sur les stocks de COS, en retenant uniquement les usages pour lesquels le nombre d'observations était supérieur à 5. Dans les Andosols sur cendres, les sols sous prairie stockent significativement plus de COS que les sols sous canne et banane (Table 5). Dans les Andosols sur tuf, seuls les sols sous forêt et sous canne présentent des stocks de COS significativement différents entre eux. Dans les sols brun-rouille à halloysite (Nitisols), les cultures de canne et banane stockent moins de COS que la forêt, et la prairie présente des stocks de COS intermédiaires entre ces deux pôles. Dans les sols rouges à montmorillonite, les stocks de COS sont plus élevés sous canne que sous banane. Dans les Vertisols, malgré un nombre de profils analysés important et des stocks moyens différents entre usages, ces différences de stocks ne sont pas significatives.

Ces résultats confirment ainsi que les stocks de COS les plus élevés se retrouvent sous forêt, et que dans certaines situations, les stocks de COS sous canne sont plus élevés que sous banane. Cependant,

ces résultats soulignent la difficulté à mettre en évidence un effet de l'usage sur les stocks de COS, étant donné la forte hétérogénéité des stocks de COS au sein d'un même type de sol et d'un même usage.

Type de sol	Usage	n	Stock COS 0-30 cm (Mg ha ⁻¹)
Andosols sur cendres	Banane	26	71,3 ^b ± 23,3
	Canne	5	57,1 ^b ± 21,8
	Prairie	27	89,5 ^a ± 25,2
Andosols sur tuf	Banane	6	59,8 ^{ab} ± 23,8
	Canne	9	56,5 ^b ± 13,4
	Forêt	5	109,7 ^a ± 35,3
	Jachère	6	75,1 ^{ab} ± 34,9
	Prairie	10	87,9 ^{ab} ± 37,6
Sols brun-rouille à halloysite	Banane	24	42,4 ^b ± 8,7
	Canne	11	41,3 ^b ± 12,4
	Forêt	5	64,9 ^a ± 12,5
	Prairie	27	48,0 ^{ab} ± 17,4
Sols rouges à montmorillonite	Banane	18	53,0 ^b ± 15,2
	Canne	27	71,8 ^a ± 22,2
Vertisols	Banane	6	37,0 ^a ± 8,9
	Canne	21	60,3 ^a ± 33,1
	Forêt	8	69,8 ^a ± 24,2
	Jardin créole	8	58,4 ^a ± 17,4
	Maraîchage	19	46,9 ^a ± 11,5
	Prairie	65	53,7 ^a ± 20,0

Table 5. Stocks de COS selon l'usage et par grand type de sol (moyenne ± écart type) (source des données : Blanchart et Bernoux, 2005 ; Venkatapen, 2012)

n : nombre d'échantillons. Les lettres figurant en exposant correspondent aux groupes statistiques déterminés après Anova et analyse post-hoc au seuil 0,05 (Tukey).

La relation entre la teneur en particules fines (<20 µm) et les stocks de COS a été analysée au regard de l'usage du sol par Venkatapen (2012), dans les sols non allophaniques (Figure 14). Cette relation met en évidence l'effet de l'usage du sol sur les stocks de COS, puisque si les stocks de COS sont corrélés à la teneur en particules fines, les usages prairie et forêt sont situés dans la partie haute du nuage de points, et sont plus riches en COS que les sols des autres usages à teneur égale en particules fines. Les sols sous canne présentent des valeurs intermédiaires, tandis que les stocks de COS les plus faibles sont observés pour les systèmes de banane et maraîchers-vivriers. Cette relation met également en évidence que le potentiel d'augmentation des stocks de COS en changeant d'usage du sol dépend de la texture : ce potentiel est faible lorsque les sols sont pauvres en particules fines, et augmente avec la teneur en particules fines (Feller et al., 2001). Cette relation entre potentiel de stabilisation du COS ou d'augmentation des teneurs en COS, usage du sol, et teneur en particules fines, a également été mis en évidence dans d'autres contextes, tropicaux (Fujisaki et al., 2018) ou non (Feng et al., 2013).

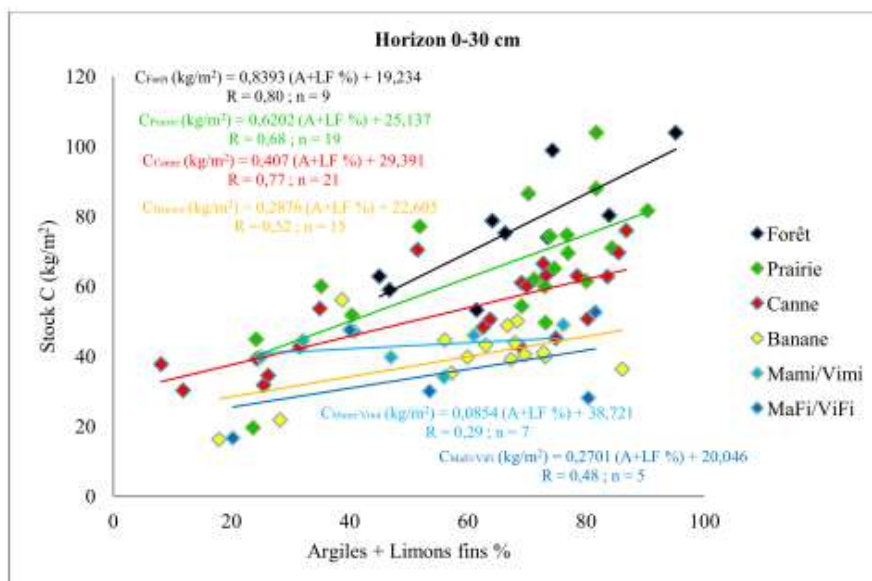


Figure 14. Relation entre les stocks de COS et la teneur en éléments fins < 20µm dans les sols non-allophaniques, et selon l'usage du sol (in Venkatapen, 2012)

Mami/Vimi : cultures maraîchères et vivrières avec périodes de jachère comprises entre 6 mois et 2 ans ;
 MaFi/ViFi : cultures maraîchères et vivrières avec périodes de jachère inférieures à 6 mois.

3.6 Spatialisation des stocks de COS

3.6.1 Méthodologie

Les stocks de COS ont été spatialisés à la Martinique au cours des travaux de Blanchart et Bernoux (2005) et Venkatapen (2012). Ces travaux se sont appuyés sur la méthode suivante : à partir de la base de données contenant les stocks de COS pour 855 profils, une matrice des stocks de COS selon le type de sol et l'usage du sol a été construite. Ces calculs ont été effectués sur trois profondeurs : 0-10, 0-30 et 0-100 cm. Parallèlement, les cartes des unités de sol et des modes d'usage ont été croisées, formant des unités spatiales sol-usage. Deux cartes des modes d'usage ont été numérisées et utilisées, la première pour les années 1969-1970, et la seconde pour les années 1979-1980. Le stock de COS de chaque unité sol-usage a été attribué selon la valeur fournie par la matrice de stocks de COS, aboutissant à deux cartes des stocks de COS à l'échelle de la Martinique, pour les années 1970 et 1980. Etant donné la variabilité des stocks de COS par type de sol et d'usage (voir section 3.3), les cartes de stocks produites sont soumises à une incertitude importante, estimée à 40% par Venkatapen (2012).

3.6.2 Carte des stocks de COS sur la couche 0-30 cm

La carte des stocks de COS sur la couche 0-30 cm en 1980 est présentée en Figure 15. Carte des stocks de COS sur la couche 0-30 cm à la Martinique (source des données : Blanchart et Bernoux, 2005). La variabilité spatiale des stocks de COS est principalement illustrée par la distribution spatiale des sols, avec les stocks de COS les plus élevés que l'on retrouve dans les régions à Andosols, dans les montagnes du nord de l'île. Les stocks de COS les plus faibles se retrouvent sur les flancs des montagnes ou à proximité du littoral (sols jeunes formés sur des dépôts volcaniques récents). Les stocks de COS peu élevés (entre 30 et 45 Mg ha⁻¹) cartographiés dans le sud-ouest et le sud-est de l'île correspondent à des zones de savanes sèches sur des Vertisols, dont le stock moyen est évalué à 44,7 Mg ha⁻¹.

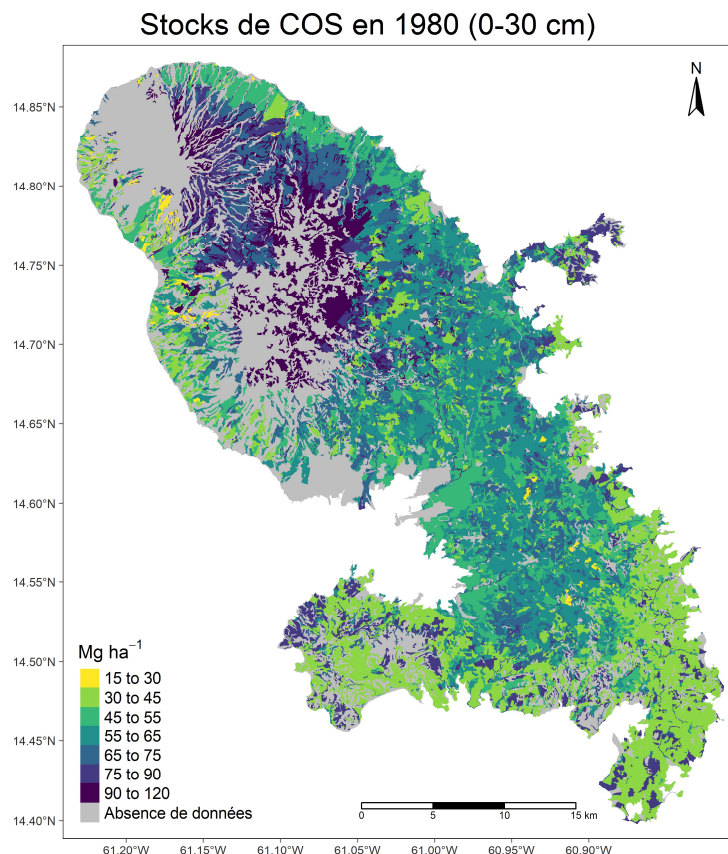


Figure 15. Carte des stocks de COS sur la couche 0-30 cm à la Martinique (source des données : Blanchart et Bernoux, 2005)

3.6.3 Stocks de COS totaux à la Martinique

Les stocks de COS totaux peuvent être calculés à partir des stocks de COS spatialisés. La surface totale spatialisée correspond à environ 810 km², soit 71 % du territoire (la Martinique a une superficie de 1128 km²) (Table 5). La part de surfaces non couvertes par la spatialisation des stocks de COS correspond principalement aux zones naturelles sans sols (roches volcaniques nues ou avec une végétation pionnière) et aux zones urbanisées. Pour la couche 0-30 cm, 6,50.10⁶ Mg de COS sont présents dans les sols de Martinique, sur une superficie de 1077 km². En valeur absolue, les sols contenant le plus de COS sont les Vertisols et les Andosols sur cendres, avec environ 10⁶ Mg au total pour chacune de ces deux unités de sol.

Type de sol	Superficie (km ²)	Stock de COS 0-30 cm (10 ⁶ Mg)
Andosols sur cendres	110,0	0,968
Andosols sur tuf	81,7	0,562
Sols jeunes	47,3	0,228
Sols brun-rouille à halloysite	67,7	0,371
Ferrisols	115,0	0,634
Intergrades Ferrisols – Sols rouges	42,4	0,240
Sols rouge à montmorillonite	59,1	0,371
Sols vertiques	26,4	0,133
Vertisols	192,0	1,000
Absence de sols ou de données	267,6	0
Total	1077,0	6,500

Table 5. Superficie totale et stocks de COS totaux par type de sol à la Martinique (source des données : Blanchart et Bernoux, 2005)

4 Effets des changements/maintien d'usage des sols sur les stocks de carbone du sol

L'effet des changements d'usage à la Martinique a été étudié selon plusieurs approches.

La première approche consiste à comparer les stocks de COS entre plusieurs parcelles adjacentes ou provenant de sites avec des situations pédoclimatiques similaires. De nombreuses situations ont été comparées à la Martinique, notamment les transitions entre des usages naturels (forêt, prairies non cultivées) et des cultures annuelles et pérennes (canne, banane, cultures maraîchères). Un des inconvénients de cette approche dans les données disponibles pour la Martinique est l'absence d'expression des stocks de COS à masse équivalente de sol, qui peut mener à une surestimation des stocks de COS après un changement d'usage menant à un tassement des sols.

La seconde approche employée a été l'étude de parcelles sur lesquelles les stocks de COS ont été mesurés avant le changement d'usage et plusieurs années après le changement d'usage (suivi diachronique). Cette approche fournit des résultats de meilleure qualité en raison de i) l'élimination de la variabilité pédologique inter-sites rencontrée dans l'approche par comparaison de parcelles adjacentes ; ii) la connaissance de l'âge des transitions. Cette approche a été utilisée à la Martinique pour l'étude des transitions entre prairies et cultures maraîchères dans le sud de l'île.

4.1 Forêt vers cultures pérennes et annuelles

Les forêts constituent le biome dominant à la Martinique, et peuvent être présentes sous plusieurs formes, telles que les forêts humides d'altitude et les forêts sèches sur le littoral. Le développement des cultures annuelles et pérennes s'est majoritairement fait au détriment des forêts, entraînant des changements de stocks de COS qui ont été quantifiés en comparant des parcelles adjacentes présentant des caractéristiques pédologiques similaires, mais avec un âge des systèmes agricoles non renseigné.

Quels que soient le type de sol et le type de transition (vers des systèmes pérennes comme la banane ou la canne ou vers des systèmes en maraîchage), la conversion de forêts en systèmes cultivés entraîne une diminution des stocks de COS comprise entre 22,9 et 30,8 Mg ha⁻¹, représentant entre 24,8 et 52,6 % du stock de COS de référence sous forêt (Table 6). Ces diminutions sont fréquemment observées en milieu tropical, en raison des diminutions des entrées de carbone arrivant au sol à la suite de la déforestation, et de l'augmentation de la vitesse de minéralisation de la matière organique à la suite de la mise en culture (Don et al., 2011).

Transition	Type de sol	Différence de stock		Prof. sol cm	Référence
		Mg C ha ⁻¹	%		
Forêt vers banane ou canne	Andosols	-22,9	-24,8	0-20	Feller et al. (2001)
	Ferrisol	-23,3	-32,0	0-20	
	Vertisols	-30,8	-52,6	0-20	
Forêt vers maraîchage	Nitisol	-27,3	-37,4	0-30	Venkatapen (2012)
	Nitisol	-26,0	-37,1	0-30	Venkatapen (2012)

Table 6. Effet des transitions de la forêt vers des cultures pérennes et annuelles sur les stocks de COS à la Martinique.

Les différences (%) sont exprimées par rapport au stock de COS mesuré sous forêt.

4.2 Prairies vers cultures annuelles et pérennes

Les transitions des prairies vers des cultures annuelles ou pérennes ont été étudiées lors de plusieurs travaux conduits à la Martinique.

Ndandou (1998) a étudié l'effet de la conversion d'une prairie pâturée en parcelles de maraîchage (avec deux modalités de travail du sol). Dans cette expérimentation diachronique, les stocks de COS ont été mesurés 1,5 année après le changement d'usage. En moyenne, les stocks de COS ont diminué de 16.5 Mg ha⁻¹, soit une diminution de 11% du stock de COS initial, pour la couche 0-40 cm (* in Feller et al. (2001)

Table 7). Les stocks de COS calculés dans cette étude n'ont pas été exprimés à masse équivalente de sol ; or la densité apparente du sol a diminué à la suite de la conversion des prairies en maraîchage (Tableau 9). Si l'on exprimait les stocks de COS à masse équivalente de sol, la perte de COS à la suite de la conversion des parcelles en maraîchage serait donc légèrement atténuée, mais ces pertes resteraient néanmoins très importantes. Ces pertes importantes sont à la fois expliquées par des pertes de sols dues à l'érosion, ces Vertisols étant très érodibles, et par la minéralisation accrue de la matière organique dans les parcelles maraîchères.

Venkatapen (2012) a comparé les stocks de COS entre des sites adjacents occupés par des prairies naturelles et des parcelles en maraîchage ou en banane, mais dont l'âge n'est pas connu, avec une démarche synchronique. Les parcelles cultivées présentent systématiquement des stocks plus faibles que ceux mesurés sous prairie, avec des variations absolues comprises entre -21,0 et -2,1 Mg COS ha⁻¹, soit une diminution du stock de C par rapport aux prairies comprise entre 4,7 et 33,9 %. Les diminutions de stocks observées peuvent être expliquées par les mêmes raisons que celles aboutissant aux pertes de COS à la suite de la conversion de surfaces forestières, à savoir une réduction des entrées de C arrivant au sol et une augmentation des vitesses de minéralisation de la matière organique à la suite de la mise en culture. Les diminutions de stocks de COS observées dans le cas de la conversion des prairies sont cependant plus faibles que celles observées dans le cas de la conversion des forêts.

Transition	Type de sol	Différence de stock		Prof. sol cm	Référence
		Mg C ha ⁻¹	%		
Prairie vers maraîchage	Vertisols	-16,5	-11,0	0-40	Ndandou (1998)*
	Sols jeunes	-3,0	-15,3	0-30	Venkatapen (2012)
	Nitisols	-11,9	-20,7	0-30	Venkatapen (2012)
	Alluvions	-2,1	-4,7	0-30	Venkatapen (2012)
Prairie vers banane	Nitisols	-21,0	-33,9	0-30	Venkatapen (2012)
Prairie vers canne	Vertisols	-3,4	-4,4	0-30	Venkatapen (2012)

* in Feller et al. (2001)

Table 7. Effet des transitions des prairies vers des cultures annuelles et pérennes sur les variations de stocks de COS à la Martinique

Les différences (%) sont exprimées par rapport au stock de COS mesuré sous prairie.

4.3 Cultures annuelles vers prairies

La transition depuis des cultures annuelles vers des prairies a été étudiée par Chevallier (1999) en diachronie sur un site d'étude dans le sud de la Martinique. Les sols du site d'étude sont des Vertisols. Sur ce site, des parcelles cultivées en maraîchage ont été converties en parcelles de prairie pâturées, et les stocks de COS ont été mesurés avant et après changement d'usage, jusqu'à 6 ans après conversion des parcelles. Cette étude a mis en évidence une augmentation des stocks de COS de 7,0 Mg COS ha⁻¹ dans la couche 0-30 cm, soit une augmentation de 15,9 % du stock de COS initial (Chevallier et al., 2000).

4.4 Cultures pérennes vers cultures annuelles

Les transitions des cultures de canne ou banane vers des cultures maraîchères ou d’ananas ont été étudiées dans quelques situations à la Martinique par le biais de comparaisons de stocks de COS sur des parcelles adjacentes présentant des caractéristiques pédologiques similaires. Ces transitions entraînent des diminutions de stocks de COS comprises entre 9 et 36 % du stock de COS mesuré dans les parcelles témoin (Table 8).

Transition	Type de sol	Différence de stock		Prof. sol cm	Référence
		Mg C ha ⁻¹	%		
Canne - Ananas	Sols jeunes	-12.6	-36	0-30	Venkatapen (2012)
Banane - Maraichage	Vertisols	-8.2	-23	0-30	Venkatapen (2012)
Canne/Banane - Maraichage	Andosols sur tuf	-10.5	-20	0-20	Albrecht et al. (1992a)
Banane - Ananas	Sols jeunes	-4.7	-9	0-20	Albrecht et al. (1992a)

Table 8. Effet des transitions des cultures pérennes vers des cultures annuelles sur les variations de stocks de COS à la Martinique

Les différences (%) sont exprimées par rapport au stock de COS mesuré dans les cultures pérennes.

4.5 Changements d’usage actuels et futurs à la Martinique : quel effet sur les stocks de COS ?

Les transitions étudiées à la Martinique ont surtout concerné des conversions de surfaces occupées par une végétation naturelle (forêts, savanes herbeuses, prairies) vers des usages agricoles. Ces transitions ont conduit à des pertes de carbone plus ou moins importantes selon les types de sol. Or ce type de transition est désormais rare, et n’a concerné que de faibles surfaces entre les années 2000 et 2012, avec 7 ha de forêts converties en surfaces agricoles (données Corine Land Cover). Les données Corine Land Cover entre 2000 et 2012 montrent que les changements d’occupation les plus importants concernent différents modes d’occupation agricoles (systèmes culturaux complexes vers bananeraies : 209 ha ; bananeraies vers prairies : 100 ha ; canne à sucre vers bananeraies : 96 ha), pour lesquels peu de données sur les stocks de COS ont été acquises. Il est également important de noter l’importance de l’artificialisation des sols dans les dynamiques de changements de mode d’occupation, avec 255 ha de surfaces agricoles converties en territoires artificialisés entre 2000 et 2012. Les sols artificialisés représentent à la Martinique 15% du territoire en 2018, contre en moyenne 9% en France métropolitaine (Agreste, 2021). L’effet de l’artificialisation des sols sur les stocks de COS n’est pas documenté à la Martinique ni dans les autres territoires d’Outre-mer, alors qu’elle est un des changements à documenter dans les PCAET (Plan climat-air-énergie territorial).

Une possibilité d’évolution des changements d’usage des sols de la Martinique serait le développement de surfaces agricoles destinées à l’alimentation locale, notamment les cultures fruitières et légumières (Marzin et al., 2021). Si ces cultures se développent au dépend des cultures d’exportation telles que la canne et la banane, une diminution de stocks de COS associée à ces changements d’usage pourrait être attendue, comprise entre 9 et 36 % du stock de COS sous cultures pérennes (Table 8).

Il existe un regain d’intérêt pour le développement de la « petite agriculture familiale », qui concerne des petites exploitations caractérisées par une forte diversification des productions ; ces systèmes sont appelés « jardin créole » dans les Antilles. Ces systèmes, de par leur diversification, offriraient une meilleure résilience face aux aléas climatiques que les monocultures de canne et banane, et leur développement contribuerait à alimenter le marché local (Bignon and Cornano, 2015 ; Ozier-

Lafontaine et al., 2018). Les transitions des systèmes de banane et canne vers ces systèmes diversifiés n'ont cependant pas été étudiées à la Martinique sous l'angle des changements de stocks de COS.

Changement de mode d'occupation entre 2000 et 2012 (état initial - état final)	Superficie (ha)
Bananaeraies - Canne à sucre	26
Bananaeraies - Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole	100
Bananaeraies - Systèmes cultureux et parcellaires complexes	8
Bananaeraies - Terres arables hors périmètres d'irrigation	6
Bananaeraies - Territoires artificialisés	24
Canne à sucre - Bananaeraies	96
Canne à sucre - Territoires artificialisés	5
Forêts - Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants	7
Forêts - Territoires artificialisés	10
Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole - Canne à sucre	47
Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole - Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants	8
Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole - Territoires artificialisés	97
Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole - Végétation arbustive et/ou herbacée	52
Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants - Territoires artificialisés	61
Systèmes cultureux et parcellaires complexes - Bananaeraies	209
Systèmes cultureux et parcellaires complexes - Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole	24
Systèmes cultureux et parcellaires complexes - Territoires artificialisés	68
Systèmes cultureux et parcellaires complexes - Végétation arbustive et/ou herbacée	15
Territoires artificialisés - Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole	19
Territoires artificialisés - Végétation arbustive et/ou herbacée	14
Végétation arbustive et/ou herbacée - Canne à sucre	8
Végétation arbustive et/ou herbacée - Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole	65
Total	969

Table 9. Changements de modes d'occupation à la Martinique entre 2000 et 2012, impliquant au moins un mode d'occupation agricole (source des données : Corine Land Cover 2000-2006 et Corine Land Cover 2006-2012)

5 Effets des changements/maintien des pratiques agricoles et forestières sur les stocks de carbone du sol

5.1 Pratiques de gestion dans les cultures pérennes

L'effet du mode de gestion des résidus de culture dans les cultures de canne à sucre a été étudié par Ripoche (2004). Les stocks de COS sur deux parcelles situées sur des Ferrisols (Ferralsols dans la classification WRB) ont été comparés après 6 années de gestion avec ou sans brûlis des résidus de culture (comparaison synchronique). Le stock de COS (couche 0-30 cm) dans la parcelle sans brûlis des résidus était de 61.8 Mg ha⁻¹, contre 54.8 Mg ha⁻¹ dans la parcelle où les résidus étaient brûlés. L'absence de brûlis représente une variation positive de 12,8% de ce stock. Cette différence de stockage s'explique par de faibles apports de C dans les parcelles où les résidus de culture sont brûlés.

L'effet du mode de gestion des bananeraies a été étudié sur des parcelles expérimentales du Cirad, sur des sols brun-rouille à halloysite. Les résultats n'ont cependant pas montré de différence significative des stocks de COS entre bananeraies intensives (avec replantations fréquentes), bananeraies pérennes, et bananeraies en rotation avec la canne à sucre ou l'ananas (Blanchart et al., 2004).

5.2 Pratiques de gestion dans les cultures annuelles

5.2.1 Mode d'intensification des systèmes maraîchers et vivriers

L'effet du mode d'intensification des systèmes maraîchers et vivriers a été étudié par Venkatapen (2012) pour des sols à argiles de type 2/1 et 1/1. Ce mode d'intensification est déterminé par la durée des périodes de jachère entre les cultures, inférieure à 6 mois (système fortement intensifié) ou comprise entre 6 mois et 2 ans (système moyennement intensifié). Les stocks de COS ont été mesurés sur plusieurs parcelles en maraîchage sur l'ensemble de l'île au cours des travaux de Venkatapen (2012). L'effet du mode d'intensification n'est donc pas analysé sous l'angle d'une approche synchronique ou diachronique, mais analysé globalement, en prenant en compte la teneur en particules fines des sols étant donné l'importance de cette variable sur les stocks de COS pour un même usage du sol (Figure 15). Les résultats montrent une forte dispersion des données en particulier pour les parcelles fortement intensifiées, avec des stocks de COS inférieurs à 30 Mg ha⁻¹ pour trois parcelles, et supérieurs à 45 Mg ha⁻¹ pour deux parcelles. Les stocks de COS dans les systèmes moyennement intensifiés sont compris entre 33 et 48 Mg ha⁻¹. Les stocks de COS moyens entre ces deux modalités ne sont pas significativement différents au seuil p<0,05. Il est donc difficile de conclure sur l'effet de la durée des jachères dans les systèmes maraîchers et vivriers à la Martinique.

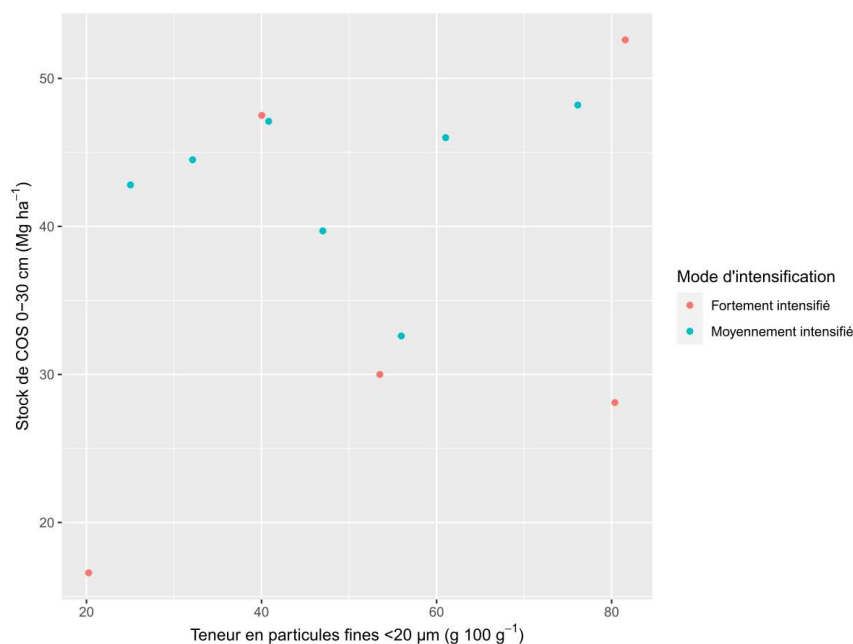


Figure 16. Stocks de COS dans des parcelles en maraîchage et cultures vivrières selon la teneur en particules fines et le mode d'intensification des systèmes (source des données : Venkatapen, 2012)

Système fortement intensifié : jachère inférieure à 6 mois entre les cultures ; système moyennement intensifié : entre 6 mois et 2 ans de jachère entre les cultures.

5.2.2 Travail du sol dans les cultures maraîchères

L'effet du travail du sol dans les cultures maraîchères a été étudié par Ndandou (1998) en utilisant une approche synchronique sur des parcelles de prairie converties en maraîchage, sur des Vertisols.

15 mois après conversion en maraîchage, le stock de COS dans la modalité avec travail du sol superficiel (10-15 cm) était de 82,6 Mg ha⁻¹, contre 71,1 dans la modalité avec travail du sol profond (30-40 cm). Les deux modalités ont entraîné une baisse des stocks de COS par rapport à la prairie initiale (93,3 Mg COS ha⁻¹) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Comme cela a été mentionné précédemment pour ces travaux, les stocks de COS n'ont pas été calculés à masse équivalente de sol. Ces travaux montrent que le travail superficiel du sol permet de limiter les pertes de COS à la suite des conversions prairie-maraîchage. Les pertes de COS accrues par le travail profond du sol s'expliquent par une augmentation de la minéralisation de la matière organique et par l'augmentation du taux d'érosion.

Site	Layer (cm)	C (g . kg ⁻¹ soil) ^a	Bulk density	C (t . ha ⁻¹) ^b	
				Mean	s.d.
Artificial meadow (Pr10)	0-10	36.9a	1.07	36.5	6.0
	10-20	21.9b	1.07	23.4	3.8
	20-30	16.4c	1.07	17.5	2.9
	30-40	12.2c	1.05	12.8	1.8
	0-40			93.3	11.0
Market-Gardening (ST15)	0-10	29.3e	0.94	27.5	2.9
	10-20	26.7b	1.00	26.7	3.7
	20-30	15.8c	1.06	16.8	2.5
	30-40	11.1c	1.05	11.7	1.8
	0-40			82.6	7.0
Market-Gardening (DT15)	0-10	21.1b	0.94	19.8	1.5
	10-20	22.6b	1.00	22.6	2.8
	20-30	17.3bc	1.06	18.2	4.7
	30-40	10.0c	1.05	10.5	1.7
	0-40			71.1	7.5

^aThe mean values with a same letter did not statistically differ at the probability of 5% (PLSD test of Fisher). The mean values were calculated from 6 replicates for market-gardening ST15 and DT15 and 20 replicates for artificial meadow. ^bThe standard deviations (s.d.) were calculated from mean values and 3 replicates of bulk density.

Table 10. Teneurs en COS, densité apparente et stocks de COS mesurés dans une prairie artificielle et après 15 mois de cultures maraîchères, selon deux modalités de travail du sol, in Feller et al (2001), adapté de Ndandou (1998)

ST : travail du sol superficiel, 10-15 cm ; DT : travail du sol profond, 30-40 cm

5.3 Pratiques de gestion actuelles et futures à la Martinique : quel effet sur les stocks de COS ?

Les données disponibles sur l'effet des changements de pratiques de gestion à la Martinique, acquises avant les années 2010, ne sont pas en adéquation avec les besoins de connaissances actuels sur l'effet des pratiques de gestion. En effet, pour le cas de la canne à sucre, la pratique du brûlis des résidus de culture a été abandonnée et n'est plus en enjeu actuel. Les pratiques de gestion étudiées dans les systèmes bananiers (fréquence de replantation et rotations avec la canne à sucre) n'ont pas permis de mettre en évidence des différences de stocks de COS selon ces pratiques. Les systèmes pérennes, comme dans les autres îles des Outre-mer français, semblent présenter des stocks de COS relativement élevés, bien que plus faibles que les forêts.

Les enjeux de maintien voire d'augmentation des stocks de COS se situeraient donc au niveau des systèmes de cultures maraîchères et vivrières, dont le développement pourrait être encouragé ces prochaines décennies, et dont l'implantation aux dépens de prairies ou de cultures annuelles entraîne une diminution des stocks de COS, lorsque les systèmes sont gérés de manière conventionnelle. La seule pratique influençant les stocks de COS dans les systèmes maraîchers identifiée à la Martinique est le travail du sol (profondeur et fréquence), avec une diminution des stocks de COS accrue lorsque le sol est travaillé en profondeur (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le mode d'intensification des systèmes maraîchers, déterminé par la durée des jachères entre les cultures, est, au vu des données disponibles, une variable insuffisamment pertinente pour déterminer les changements de stocks de COS. Au vu des stocks importants que présentent les prairies fertilisées (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), un mode de gestion durable vis-à-vis du COS serait la mise en place de rotations cultures maraîchères / prairies (Blanchart and Bernoux, 2005).

Un certain nombre de pratiques de gestion sont actuellement promues dans une perspective de transition agroécologique de l'agriculture aux Antilles, telles que l'apport d'amendements organiques, les associations culturales, l'agroforesterie, ou la pratique du jardin créole. L'effet de ces pratiques sur les stocks de COS n'est actuellement pas renseigné à la Martinique. Etant donné la proximité des contextes agropédoclimatiques entre la Martinique, la Guadeloupe et La Réunion, les connaissances disponibles pour ces pratiques en Guadeloupe et à La Réunion pourront être mises à profit dans le contexte martiniquais. Cette analyse inter-DROM de l'effet des pratiques de gestion est traitée dans une synthèse spécifique au sein de l'Etude 4 pour 1000 Outre-mer.

6 Synthèse et perspectives

Les données disponibles sur le stockage de COS à la Martinique ont mis en évidence l'effet de la typologie des sols, de la granulométrie et de l'usage du sol sur les stocks de COS. Il subsiste néanmoins une importante hétérogénéité des stocks de COS selon ces variables, qui reste difficile à expliquer.

La spatialisation des stocks de COS, réalisée selon les modes d'usages présents dans les années 1970 et 1980, mériterait d'être actualisée, en raison des changements d'usages et de pratiques agricoles intervenus depuis les années 1980, mais aussi de la possible instabilité des stocks de COS pour certains usages agricoles - érosion et minéralisation continue sous cultures maraîchères par exemple.

L'évolution tendancielle des stocks de COS n'a pas pu être analysée à la Martinique. En se basant sur les données des îles volcaniques d'Outre-mer (La Réunion et Guadeloupe), il est probable que les stocks de COS des cultures pérennes soient proches de l'équilibre, tandis que les stocks de COS des cultures annuelles et vivrières tendraient à décroître.

Les changements d'usage des sols étudiés à la Martinique conduisent pour la plupart à une diminution des stocks de COS : ces changements concernent les transitions des forêts ou prairies vers des cultures annuelles ou pérennes, ou des cultures pérennes vers des cultures annuelles. Seules les transitions des systèmes maraîchers vers des prairies ont entraîné une augmentation des stocks de COS. La plupart des données disponibles sur les changements d'usage ne renseignent pas l'âge des transitions, ce qui limite la portée des résultats.

L'effet des pratiques de gestion sur les stocks de COS a été peu étudié à la Martinique. Il a cependant été montré que la nature et l'intensité du travail du sol pouvaient jouer un rôle majeur sur la dynamique des stocks de COS, de par leurs conséquences sur l'érosion et la minéralisation de la matière organique.

L'effet des pratiques de gestion dans les cultures annuelles (maraîchage, tubercules) liées aux amendements organiques, aux associations culturales, aux rotations de cultures, à l'agroforesterie, mériterait d'être analysé à la Martinique. Une possible orientation des politiques publiques vers un soutien aux systèmes de production diversifiés pour des enjeux d'alimentation locale nécessiterait de trouver un compromis avec le maintien des stocks de COS dans les systèmes de cultures annuels, le maraîchage étant généralement défavorable au stockage de COS en contexte tropical. L'opportunité d'apporter aux sols des composts contenant des matières organiques d'origine urbaine et agro-industrielle mériterait également d'être évaluée (quantification des gisements organiques et qualité des composts), au vu de l'urbanisation importante de l'île.

7 Bibliographie

- Agreste, 2021. L'occupation du sol entre 1982 et 2018.
- Agreste Martinique, 2019. Mémento agricole.
- Albrecht, A., Brossard, M., Chotte, J.-L., Feller, C., 1992a. Les stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique (Petites Antilles). Cah. ORSTOM Série Pédologie 27, 23–36.
- Albrecht, A., Rangon, L., Barret, P., 1992b. Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). Cah. ORSTOM Série Pédologie 27, 121–133.
- Allo, M., 2019. Usages et changements d'usages des sols agricoles : impacts sur les stocks de carbone organique du sol en milieu volcanique tropical. Approche spatiale et bilan des gaz à effet de serre à l'île de La Réunion. Université de Montpellier.
- Barthès, B.G., Kouakoua, E., Larré-Larrouy, M.-C., Razafimbelo, T.M., de Luca, E.F., Azontonde, A., Neves, C.S.V.J., de Freitas, P.L., Feller, C.L., 2008. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. Geoderma 143, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.10.003>
- Bartoli, F., Burtin, G., 2007. Organo-mineral clay and physical properties in COST 622 European volcanic soils, in: Arnalds, Ó., Óskarsson, H., Bartoli, F., Buurman, P., Stoops, G., García-Rodeja, E. (Eds.), Soils of Volcanic Regions in Europe. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 469–491. https://doi.org/10.1007/978-3-540-48711-1_34
- Basile-Doelsch, I., Amundson, R., Stone, W.E.E., Masiello, C.A., Bottero, J.Y., Colin, F., Masin, F., Borschneck, D., Meunier, J.D., 2005. Mineralogical control of organic carbon dynamics in a volcanic ash soil on La Réunion. Eur. J. Soil Sci. 56, 689–703. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00703.x>
- Bignon, J., Cornano, J., 2015. Les Outre-mer français face au défi climatique : une contribution concrète à l'agenda des solutions (Rapport d'information du Sénat).
- Blanchart, E., Bernoux, M., 2005. Déterminants des stocks de carbone des sols des Petites Antilles (Martinique, Guadeloupe). Alternatives de séquestration du carbone et spatialisation des stocks actuels et simulés, Rapport du programme GESSOL, IRD. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Montpellier, France.
- Blanchart, E., Cabidoche, Y.M., Sierra, J., Venkatapen, C., Langlais, C., Achard, R., 2004. Stocks de carbone dans les sols pour différents agrosystèmes des Petites Antilles. Cah. PRAM 4, 31–34.
- Boudot, J.-P., 1992. Relative efficiency of complexed aluminum noncrystalline Al hydroxide, allophane and imogolite in retarding the biodegradation of citric acid. Geoderma 52, 29–39.
- Boudot, J.P., Hadj, B.A.B., Chone, T., 1986. Carbon mineralization in andosols and aluminium-rich highland soils. Soil Biol. Biochem. 18, 457–461. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(86\)90053-2](https://doi.org/10.1016/0038-0717(86)90053-2)
- Cabidoche, Y.M., Blanchart, E., Arrouays, D., Grolleaux, E., Lehmann, S., Colmet-Daage, F., 2004. Les Petites Antilles : des climats variés, des sols de natures contrastées et de fertilités inégales sur des espaces restreints. Cah. PRAM 21–25.
- Chevallier, T., 1999. Dynamique et déterminants du stockage du carbone dans un vertisol sous prairie (Martinique). ENSAM, Montpellier.
- Chevallier, T., Fujisaki, K., Roupsard, O., Guidat, F., Kinoshita, R., Melo Viginio Filho, E. de, Lehner, P., Albrecht, A., 2019. Short-range-order minerals as powerful factors explaining deep soil organic carbon stock distribution: the case of a coffee agroforestry plantation on Andosols in Costa Rica. SOIL 5, 315–332. <https://doi.org/10.5194/soil-5-315-2019>
- Chevallier, T., Voltz, M., Blanchart, E., Chotte, J.L., Eschenbrenner, V., Mahieu, M., Albrecht, A., 2000. Spatial and temporal changes of soil C after establishment of a pasture on a long-term cultivated vertisol (Martinique). Geoderma 94, 43–58. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00064-6)

- Chevallier, T., Woignier, T., Toucet, J., Blanchart, E., 2010. Organic carbon stabilization in the fractal pore structure of Andosols. *Geoderma* 159, 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.010>
- Colmet-Daage, F., Bernard, J., Gautheyrou, J., Gautheyrou, M., Lagache, F., Grécy, J. de, Poumaroux, A., Pallud, A., 1969. Cartes des sols de La Martinique [cartes des sols des Antilles : feuilles nos 1 à 24]. BSA, Pointe à Pitre.
- Colmet-Daage, F., Gautheyrou, J., Gautheyrou, M., 1970. Sélection de profils des Antilles avec rattachement à la classification des sols des Antilles au 1/20 000 (1960-1970) : Martinique volcanismes ancien et récent, Guadeloupe volcanismes ancien et récent. ORSTOM, Pointe-à-Pitre.
- Colmet-Daage, F., Lagache, F., 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises- fdi:18300- Horizon. *Cah. ORSTOM Sér. Pédologie* 3, 91–121.
- Don, A., Schumacher, J., Freibauer, A., 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. *Glob. Change Biol.* 17, 1658–1670. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>
- Feller, C., Albrecht, A., Blanchart, E., Cabidoche, Y.M., Chevallier, T., Hartmann, C., 2001. Soil organic carbon sequestration in tropical areas . General considerations and analysis of some edaphic determinants for Lesser Antilles soils. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 19–31.
- Feller, C., Beare, M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79, 69–116. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00039-6)
- Feng, W., Plante, A.F., Six, J., 2013. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry* 112, 81–93. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9679-7>
- Fujisaki, K., Chapuis-Lardy, L., Albrecht, A., Razafimbelo, T., Chotte, J.-L., Chevallier, T., 2018. Data synthesis of carbon distribution in particle size fractions of tropical soils: Implications for soil carbon storage potential in croplands. *Geoderma* 313, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.010>
- Germa, A., 2009. Evolution volcano-tectonique de l'île de La Martinique (arc insulaire des Petites Antilles): nouvelles contraintes géochronologiques et géomorphologiques (Thèse de doctorat). Université Paris Sud - Paris XI.
- Gis Sol, 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols.
- Huygens, D., Boeckx, P., Van Cleemput, O., Oyarzún, C., Godoy, R., 2005. Aggregate and soil organic carbon dynamics in South Chilean Andisols. *Biogeosciences* 2, 159–174. <https://doi.org/10.5194/bg-2-159-2005>
- IUSS Working Group WRB, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015 International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps, FAO, Rome. ed, World Soil Resources Reports No. 106.
- Mantran, M., Lucien-Brun, M., Angeon, V., 2017. Le zonage agroécologique aux Antilles françaises : un outil de définition du potentiel agricole et d'aide à la décision en matière d'amélioration des choix de production.
- Marzin, J., Fréguin-Gresh, S., Angeon, V., Andrieu, N., Urrutia, V.B., Cerdan, C., 2021. Étude sur les nouveaux modèles agricoles des départements d'Outre-mer. Rapport final. Cirad, AFD.
- Ndandou, J.-F.N., 1998. Variations du stock organique et des propriétés physiques d'un vertisol sous prairie après la mise en culture maraîchère : effet du mode de travail du sol. ORSTOM, Montpellier.
- Ozier-Lafontaine, H., Joachim, R., Bastié, J.-P., Grammont, A., 2018. De l'agroécologie à la bioéconomie : des alternatives pour la modernisation du système agricole et alimentaire des Outre-Mer : Note d'orientation sur les agricultures des Outre-Mer (Rapport de synthèse du Groupe de Travail Interdom de l'Académie d'Agriculture de France).

- Quesada, C.A., Paz, C., Oblitas Mendoza, E., Phillips, O.L., Saiz, G., Lloyd, J., 2020. Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. *SOIL* 6, 53–88. <https://doi.org/10.5194/soil-6-53-2020>
- Rasmussen, C., Heckman, K., Wieder, W.R., Keiluweit, M., Lawrence, C.R., Berhe, A.A., Blankinship, J.C., Crow, S.E., Druhan, J.L., Pries, C.E.H., Marin-Spiotta, E., Plante, A.F., Schädel, C., Schimel, J.P., Sierra, C.A., Thompson, A., Wagai, R., 2018. Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content. *Biogeochemistry* 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0424-3>
- Vaughan, E., Matos, M., Ríos, S., Santiago, C., Marín-Spiotta, E., 2019. Clay and climate are poor predictors of regional-scale soil carbon storage in the US Caribbean. *Geoderma* 354, 113841. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.044>
- Venkatapen, C., 2012. Etude des déterminants géographiques et spatialisation des stocks de carbone des sols de La Martinique. Université des Antilles et de la Guyane.
- Westercamp, D., Andreieff, P., Bouysse, P., Cottez, S., et al., 1989. Martinique, Notice explicative de la carte géologique au 1/50 000e, Editions du BRGM. ed. Orléans.
- Zinn, Y.L., Lal, R., Bigham, J.M., Resck, D.V.S., 2007. Edaphic Controls on Soil Organic Carbon Retention in the Brazilian Cerrado: Texture and Mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 1204. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0014>