



HAL
open science

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

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 Guadeloupe. CIRAD, IRD, INRAE. 2023. hal-04130112

HAL Id: hal-04130112

<https://hal.inrae.fr/hal-04130112>

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 Guadeloupe.*

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 Guadeloupe - 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, 36 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, thématiques traitées	5
1.2	Principales sources de données mobilisées.....	5
2	Contexte biophysique de la Guadeloupe.....	6
2.1	Situation géographique, topographie.....	6
2.2	Géologie	6
2.3	Climat.....	7
2.4	Occupation et usage des sols.....	8
2.5	Typologie des sols	10
2.6	Zonage agropédoclimatique	12
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	Stocks de COS selon le type de sol.....	13
3.3	Stocks de COS selon l'altitude.....	15
3.4	Stocks de COS selon les propriétés chimiques des sols	16
3.5	Stocks de COS selon l'usage des sols	17
3.6	Spatialisation des stocks de COS.....	18
4	Effets des changements/maintien d'usage des sols sur les stocks de carbone du sol	20
4.1	Évolution tendancielle des stocks de COS	20
4.1.1	Évolution observée des stocks de COS	20
4.1.2	Simulation des variations de stocks de COS observées	21
4.2	Effets des changements d'usage des sols sur les stocks de COS	24
4.2.1	Effet observé des transitions entre cultures pérennes et cultures annuelles	24
4.2.2	Effet simulé des transitions entre cultures pérennes et cultures annuelles	25
5	Effets des changements/maintien des pratiques agricoles et forestières sur les stocks de carbone du sol.....	27
5.1	Pratiques de gestion dans les cultures pérennes	27
5.1.1	Banane	27
5.1.2	Canne à sucre	27
5.2	Pratiques de gestion dans les cultures annuelles	28
5.3	Pratiques de gestion dans les prairies	30
6	Synthèse et perspectives	32
7	Bibliographie	34

8 Annexe 37

1 Introduction

1.1 Objectifs de la synthèse, thématiques traitées

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 Guadeloupe. Compte tenu des données disponibles, les thématiques suivantes sont traitées dans ce document, après une présentation du contexte biophysique du territoire :

- Déterminants des stocks de COS et spatialisation des stocks de COS ;
- Evolution tendancielle 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

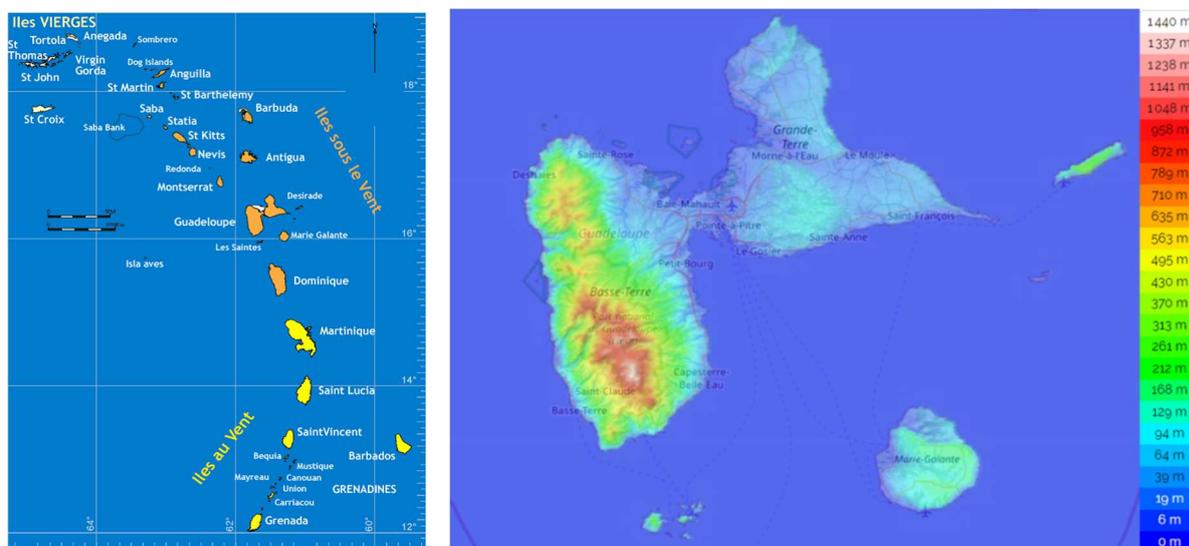
La majeure partie des travaux réalisés sur la thématique du stockage de COS en Guadeloupe concernent les sols agricoles, et ont été initiés au cours du projet TropEmis (« Evaluation régionalisée de l'EMISSion et de la séquestration de carbone dans les sols TROPicaux de Guadeloupe »), dont l'objectif était d' « analyser et modéliser les interactions entre les émissions/séquestration de C et la diversité des milieux et des systèmes de cultures en Guadeloupe » (Sierra et al., 2015b). Un des aspects novateurs du projet a été la calibration/validation d'un modèle mécaniste d'évolutions des stocks de COS (MorGwanik), adapté aux conditions agropédoclimatiques de la Guadeloupe, outil qui a ensuite été appliqué pour mettre en évidence l'effet des changements d'usages et des modes de gestion sur l'évolution des stocks de COS. La calibration du modèle MorGwanik s'est appuyée entre autres sur une base de données contenant des informations sur les stocks de COS mesurés dans différents contextes. Les données de cette base ont été exploitées pour cette synthèse.

2 Contexte biophysique de la Guadeloupe

2.1 Situation géographique, topographie

La Guadeloupe est un archipel situé dans la moitié nord de l'Arc des Antilles, entre les îles de Montserrat et Antigua au nord, et la Dominique au sud (Figure 1). L'archipel est constitué de plusieurs îles et îlets : Grande-Terre et Basse-Terre sont les deux plus grandes îles, séparées par un bras de mer. Les autres îles de l'archipel sont Marie-Galante, la Désirade, les Saintes, et Petite-Terre.

Grande-Terre présente une topographie plane de faible altitude, tandis que Basse-Terre est une île montagneuse volcanique, dont le point culminant est le volcan de la Soufrière (1467 m).



2.2 Géologie

L'émergence des îles de la Guadeloupe s'est faite sous l'influence de la formation de l'Arc des Petites Antilles, par subduction de la plaque Amérique sous la plaque Caraïbes. L'âge des roches décroît du nord-est de l'archipel vers le sud-ouest. Trois grands ensembles géologiques peuvent être distingués (Figure 2) :

- La Désirade forme un plateau de roches calcaires du Pliocène Inférieur ;
- Grande-Terre, Marie-Galante et Petite-Terre forment des plateaux coralliens (roches carbonatées) d'âge Pléistocène ;
- Basse-Terre et les Saintes sont des îles volcaniques d'âge compris entre le Pliocène et l'époque actuelle. Les roches les plus âgées ont été formées il y a 3 millions d'années dans le nord-est de Basse-Terre. D'autres ensembles volcaniques se sont formés au cours du dernier million d'années ; les dernières éruptions du volcan de la Soufrière, le plus récent de l'archipel, datent de moins de 10000 ans (IPGP, 2021).

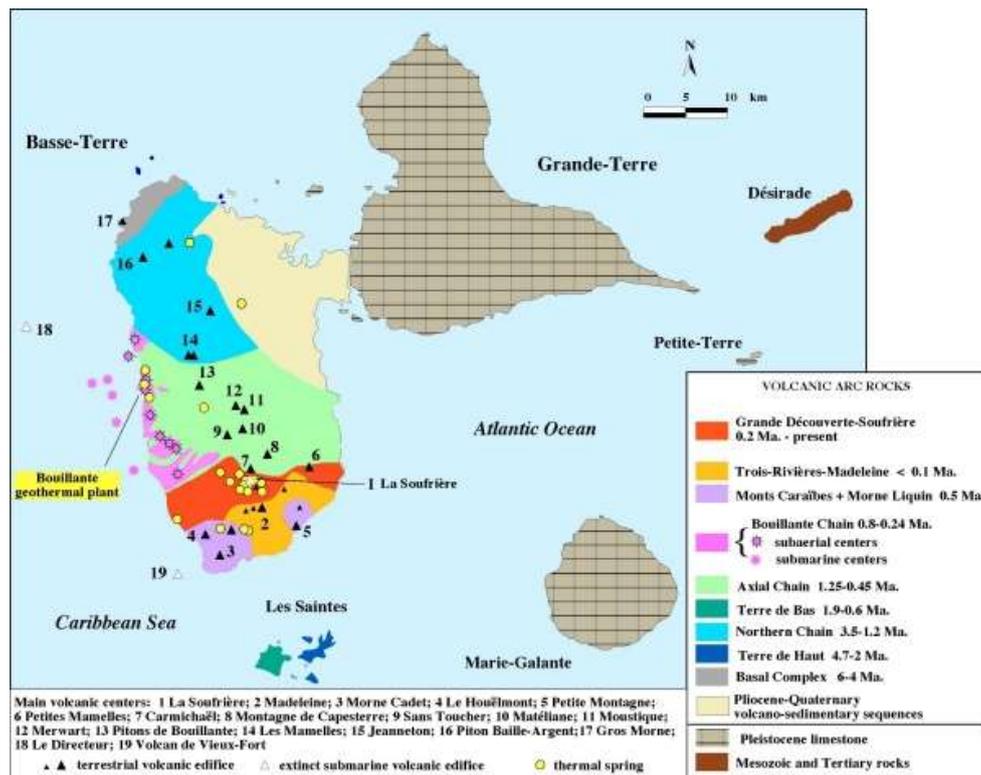


Figure 2. Carte des principaux ensembles géologiques de la Guadeloupe (Komorowski et al., 2005)

2.3 Climat

Le climat en Guadeloupe est tropical, avec une saison sèche entre les mois de janvier et juin, au cours de laquelle les températures moyennes sont également plus faibles que le reste de l'année (Figure 3). Le relief rencontré à Basse-Terre induit des contrastes de pluie et températures : les régions les plus en altitude sont très arrosées, avec des précipitations annuelles pouvant dépasser les 7000 mm.

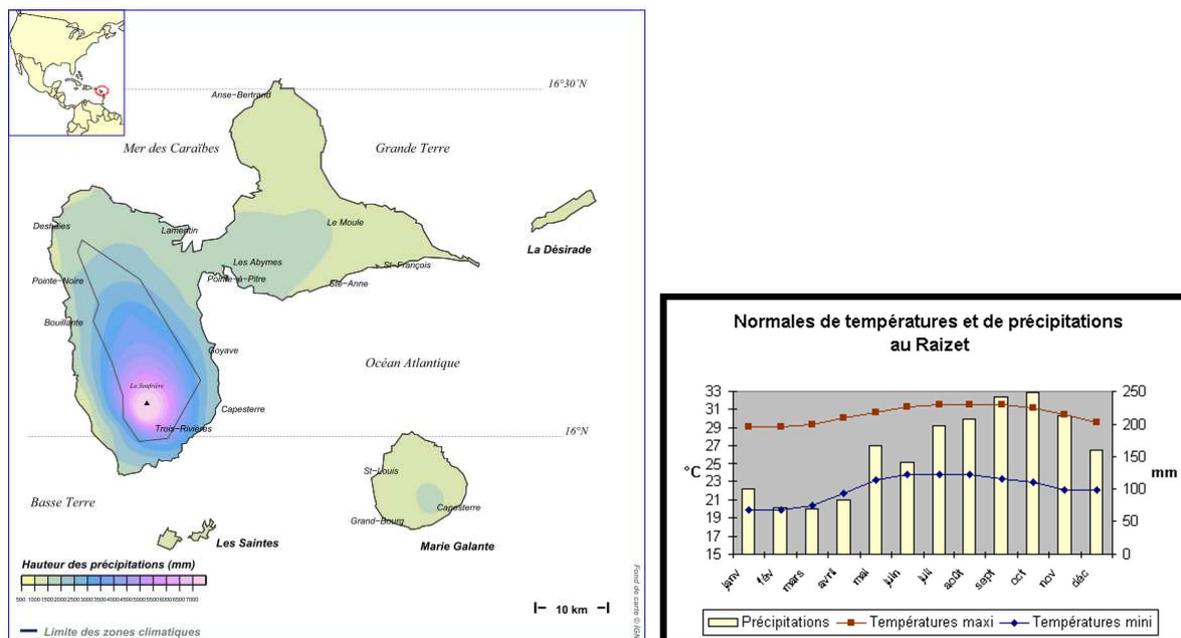


Figure 3. Précipitations annuelles moyennes (1981-2010) en Guadeloupe et normales de précipitations et température à la station du Raizet (Pointe-à-Pitre) (source des données : Météo-France)

2.4 Occupation et usage des sols

Les forêts constituent l'usage du sol dominant en Guadeloupe, représentant 49% de la surface du territoire en 2018 (Agreste, 2021). Ces forêts sont présentes dans la partie ouest et montagneuse de Basse-Terre, dans le pourtour de la baie du Grand-Cul-de-Sac-Marin sous la forme de forêts marécageuses, et sous forme de fragments forestiers dans la région des Grands Fonds (sud de Grande-Terre) (Figure 4). Les terres arables et les prairies occupent respectivement 17% et 9% de la surface de la Guadeloupe en 2018 (Agreste, 2021). Ces espaces agricoles sont présents sur l'ensemble de la Grande-Terre, tandis qu'ils occupent surtout la façade est et les contreforts de la Soufrière à Basse-Terre.

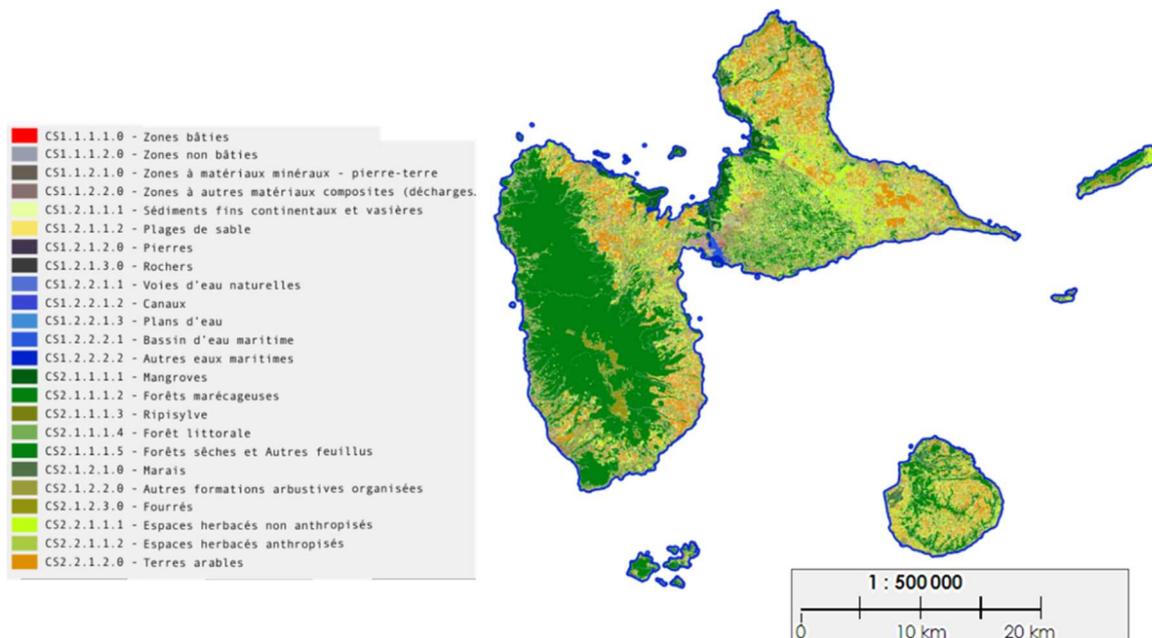


Figure 4. Usage des sols en Guadeloupe en 2017 (Karucover 2010-2017)

La majeure partie des surfaces en prairie se situent dans le nord-est de Basse-Terre, dans la moitié sud de Grande-Terre ainsi qu'à Marie-Galante (Figure 5). Les cultures de banane occupent la partie sud de Basse-Terre, sur le pourtour du volcan de la Soufrière. Les cultures de canne à sucre sont présentes dans le nord de Basse-Terre et dans la moitié nord-ouest de Grande-Terre. Les cultures maraîchères et les vergers occupent des surfaces assez faibles en Guadeloupe, mais sont présentes dans la plupart des régions agricoles : sur le littoral sud et sud-ouest de Basse-Terre, au nord de Basse-Terre, et dans la partie est et le nord de Grande-Terre.

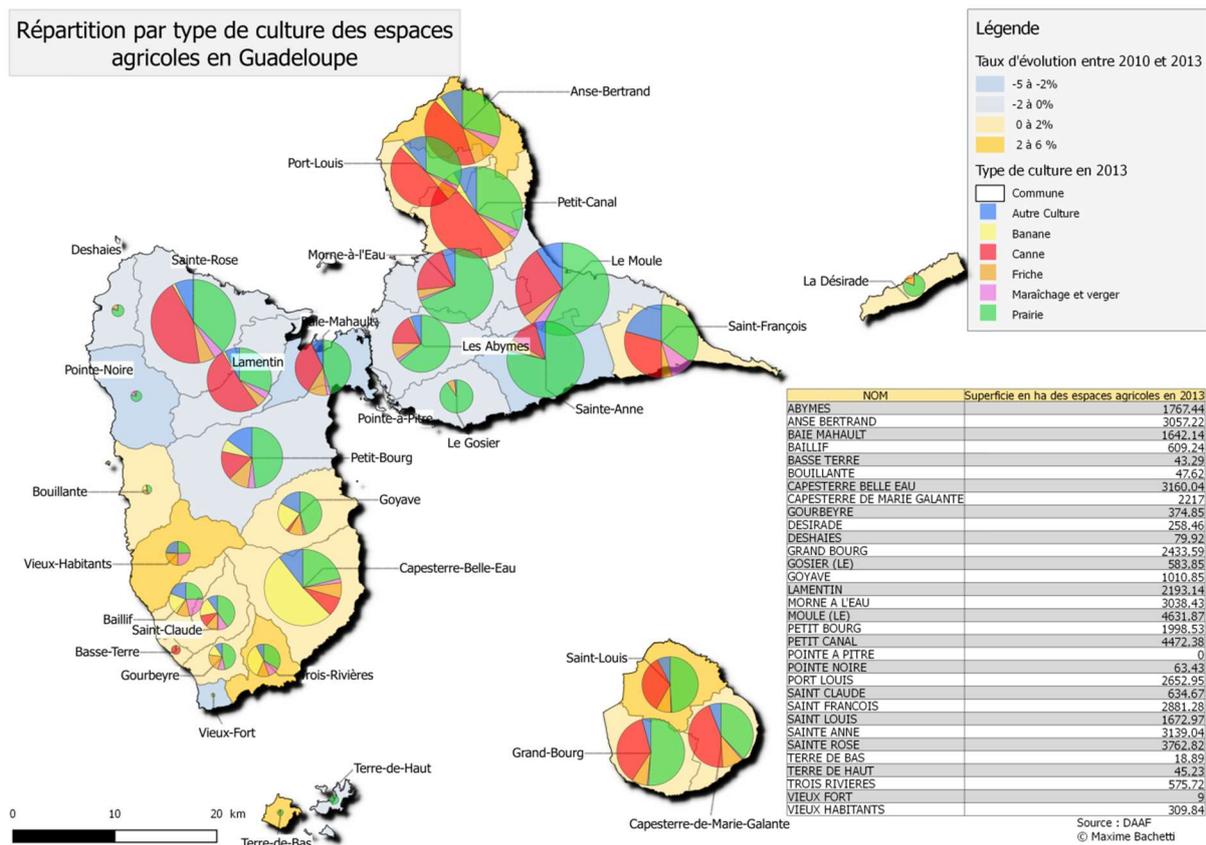


Figure 5. Répartition des types de cultures par commune en Guadeloupe, en 2013 (DAAF Guadeloupe, 2016)

2.5 Typologie des sols

Le développement pédogénétique des sols de Guadeloupe est déterminé par la nature des roches, l'âge de la pédogénèse, et la pluviométrie (Tableau 1, Sierra and Desfontaines, 2018).

L'information pédologique en Guadeloupe a été acquise à partir des années 60, au cours de programme de cartographie des sols à différentes échelles ; une carte des sols de Grande-Terre, Basse-Terre et Marie-Galante est disponible au format 1/150000 (Colmet-Daage, 1980). Des cartes sont également disponibles à des échelles plus fines : 1/10000 pour Grande-Terre (carte non publiée de Colmet-Daage, 1968), et 1/20000 pour Basse-Terre (Colmet-Daage et al., 1969). Ces informations ont été synthétisées et digitalisées au cours de travaux de l'IRD dans les années 2010 (Dupuits et al., 2015). La carte des sols figurant dans ce document est une carte simplifiée, représentant les grands ensembles de sols rencontrés en Guadeloupe (Figure 6).

Les Vertisols en Guadeloupe sont des sols pouvant se développer sur des roches volcaniques anciennes ou sur des roches sédimentaires, dans des régions où le climat subhumide avec une saison sèche marquée favorise la formation d'argiles de type 2/1 (smectites)¹. La présence de ces argiles entraîne une capacité d'échange cationique (CEC) importante dans ces sols. Les Calcisols en Guadeloupe présentent des propriétés proches des Vertisols, mais contiennent d'importantes quantités de calcaire fragmenté. Les Vertisols riches en Ca et Mg sont présents sur la façade ouest de

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.

Basse-Terre (côte sous le vent), tandis que les Vertisols et Calcisols riches en Ca sont les sols dominants à Grande-Terre et Marie-Galante (Figure 6).

Les Ferralsols se sont développés sur des dépôts volcaniques anciens, sous un climat tropical humide ; ces conditions se retrouvent dans le centre et le nord de Basse-Terre. L'altération intense des minéraux primaires entraîne la formation d'oxyhydroxydes de fer et d'argiles de type 1/1 (halloysite). Ces sols sont acides, pauvres en cations, mais présentent des bonnes qualités physiques en raison de leur microagrégation (Sierra and Desfontaines, 2018a).

Les Nitisols ont des propriétés proches de celles des Ferralsols, mais se sont développés sur des matériaux volcaniques plus récents, au pied des montagnes volcaniques de Basse-Terre (Figure 6). Ces sols contiennent des argiles de type 1/1 (halloysite), comme les Ferralsols, mais présentent des teneurs en cations plus élevées que les Ferralsols. Certains Nitisols en Guadeloupe, présents dans la côte sous le vent, contiennent des smectites en raison du climat subhumide (Figure 6).

Les Andosols se sont développés sur des matériaux volcaniques jeunes, et dans des régions très arrosées. Ces conditions entraînent la formation de minéraux amorphes dont les allophanes, qui cohabitent avec les minéraux primaires fragmentés par l'altération physique. Ces sols possèdent une CEC et une stabilité structurale élevée, les rendant peu sensibles à l'érosion. Les Andosols sont situés dans le sud de Basse-Terre, en hauteur par rapport aux Nitisols.

Les sols bruns andiques (ou Cambisols andiques dans la classification World Reference Base - WRB) sont des sols dont le développement pédogénétique est intermédiaire entre celui des Andosols et des Nitisols. On les retrouve sous forme d'un pourtour entre ces deux ensembles, dans le sud de Basse-Terre.

		Roches			
		Volcaniques		Sédimentaires	
				Calcaire	Alluvions marines
		Age (années)	10^3-10^4	10^5-10^6	10^5-10^7
Pluviométrie (mm/an)	Silice et cations	Type de sol (classification FAO)			
	pH				
1000	Accumulation		Vertisols (smectite Mg+Ca)	Vertisols et Calcisols (smectite Ca)	Sols de mangrove
	Maintien				
1500	Exportation	Nitisols	Ferralsols		
	Forte exportation				
2000					
2500		Andosols			
≥3000	Très forte exportation				

Tableau 1. Typologie des sols en Guadeloupe en fonction du type et de l'âge des roches, et de la pluviométrie (Sierra and Desfontaines, 2018)

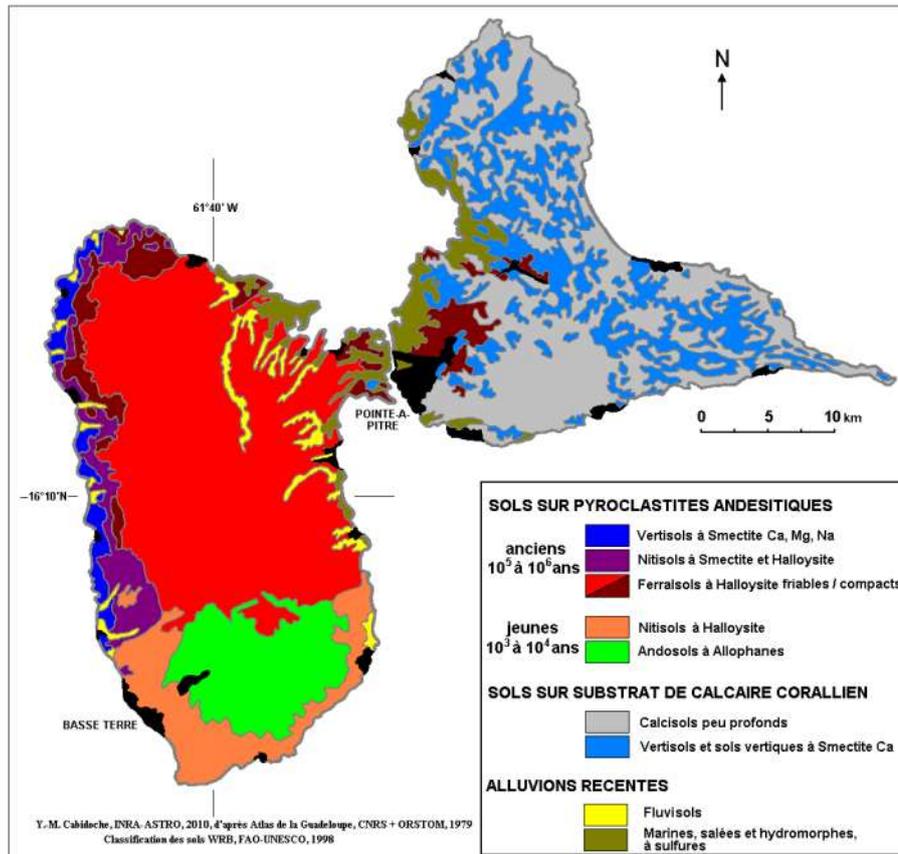
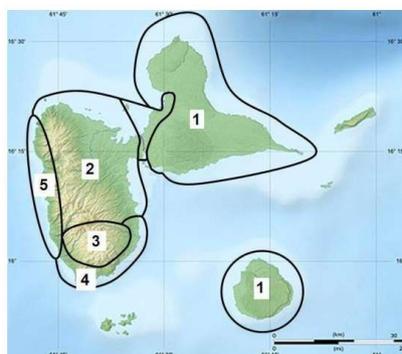


Figure 6. Carte des sols de Grande-Terre et Basse-Terre en Guadeloupe (Sierra and Desfontaines, 2018, adapté de Cabidoche, 2000)

2.6 Zonage agropédoclimatique

La combinaison des conditions pédologiques, climatiques et d'usage des sols a amené la distinction de cinq zones agropédoclimatiques pour les travaux d'évaluation des variations de stocks de COS selon les modes d'usage et les pratiques de gestion, et de modélisation de la dynamique des stocks de COS (Sierra et al., 2015a). Ces zones sont représentées en Figure 7. Elles sont parfois dénommées AER (*Agroecological region*) dans le texte et les figures de ce document.



- Région 1 : Vertisols ; Climat subhumide ; Spéculations : canne, élevage, diversification.
- Région 2 : Ferralsols ; Climat humide ; Spéculations : canne, diversification, élevage.
- Région 3 : Andosols ; Climat hyper-humide ; Spéculations : banane, diversification (canne à fibres future).
- Région 4 : Nitisols ; Climat humide ; Spéculations : banane, diversification (canne à fibres future).
- Région 5 : Sols vertiques ; Climat subhumide ; Spéculations : verger, diversification, élevage.

Figure 7. Zones agropédoclimatiques retenues dans les travaux de modélisation des changements d'usage des sols et de modes de gestion en Guadeloupe (Sierra et al., 2015b)

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

3.1 Source des données et méthodologie

La majeure partie des travaux sur le stockage de COS des sols de Guadeloupe a été initiée lors du projet TropEmis (Sierra et al., 2015b). Au cours de ce projet une base de données (BDD) a été consolidée, regroupant des données acquises par un bureau d'études (CaribAgro) et des données acquises lors du projet (CaribAgro et INRA) (Rochette et al., 2019). Dans cette BDD, les stocks de COS ont été mesurés dans 1004 parcelles géoréférencées et ayant fait l'objet de prélèvements entre 1998 et 2014. Les covariables renseignées sont l'usage au moment du prélèvement, le type de sol, ainsi que l'altitude. Les stocks de COS ont été mesurés sur la couche 0-25 cm, à partir des mesures de teneurs en COS (par combustion sèche) et de densité apparente. L'équation de calcul du stock de COS est la suivante :

$$\text{Stock COS} = [\text{COS}] \times \text{DA} \times e \times 10000$$

avec le stock de COS exprimé en Mg ha^{-1} , [COS] la teneur en carbone organique du sol (en Mg Mg^{-1} sol), DA la densité apparente du sol (en Mg m^{-3}), et e l'épaisseur de la couche de sol en m (0.25 ici) ².

La teneur en carbone organique du sol est mesurée par combustion sèche. Les échantillons de sols carbonatés et récemment chaulés sont décarbonatés avant l'analyse. La mesure du stock de COS ne tient pas compte de la teneur en éléments grossiers (>2 mm) du sol, ce qui pourrait mener à une surestimation des stocks de COS si les sols contiennent une proportion non négligeable d'éléments grossiers. En Guadeloupe, ces sols à texture grossière sont développés sur des matériaux volcaniques jeunes notamment sur le pourtour de la Soufrière, sous végétation naturelle, et ne font pas partie du territoire d'étude du projet TropEmis.

La BDD n'inclue que des sols agricoles, principalement cultivés en cultures pérennes (canne, banane, verger) ou annuelles (maraîchage, melon, tubercules, ananas). Les prairies et jachères sont peu représentées dans cette BDD, et les écosystèmes naturels y sont absents. Les parcelles agricoles présentes dans la BDD sont situées sur les îles de Grande-Terre et Basse-Terre ; les autres îles de l'archipel n'y sont pas représentées.

L'analyse de cette base de données, ainsi que des travaux de recherche dont ceux du projet TropEmis, permet de d'évaluer l'effet du type de sol, de l'altitude, des propriétés chimiques des sols, et de l'usage du sol sur les stocks de COS observés.

3.2 Stocks de COS selon le type de sol

La typologie des sols explique en partie la variabilité des stocks de COS en Guadeloupe (Figure 8 et Tableau 2). Les Andosols d'altitude (>350 m) sont les sols qui stockent le plus de COS, avec en moyenne 120.7 Mg ha^{-1} sur la couche 0-25 cm. Les Ferralsols, les Nitisols et les sols alluvionnaires présentent les stocks les plus faibles, avec respectivement 54.9, 44.7, et 44.9 Mg ha^{-1} . Les Andosols de basse altitude, les sols bruns andiques, et les Vertisols et Calcisols présentent des valeurs intermédiaires entre ces deux pôles. La minéralogie des sols explique ces variations, avec dans l'ensemble des stocks de COS décroissants dans le sens Sols à allophanes > Sols à smectites (argiles 2/1) > Sols à halloysite (argiles

² L'unité de masse retenue dans ce document est le gramme (g). Le mégagramme (Mg, 10^6 g) est équivalent à la tonne.

1/1), ce qui constitue une hiérarchie classiquement observée (Barré et al., 2014). Les stocks de COS élevés dans les Andosols sont expliqués par la présence d’allophanes, contribuant à la stabilisation de la matière organique selon différents mécanismes dont la formation de complexes métal-humus-argiles (Huygens et al., 2005) et l’emprisonnement de molécules organiques au sein de la structure fractale des agrégats d’allophanes (Chevallier et al., 2010). Les stocks de COS plus élevés dans les sols à smectites que dans les sols à halloysite peuvent s’expliquer par la nature des argiles : les argiles 2/1 présentent une plus grande capacité à stabiliser la matière organique que les argiles 1/1, en raison de la CEC et de la surface d’échange spécifique plus importantes pour les argiles 2/1 (Wattel- Koekkoek et al., 2003).

Malgré ces grandes tendances, il subsiste une importante hétérogénéité dans la distribution des stocks de COS par grand type de sol. Les coefficients de variation (CV) sont supérieurs à 25 pour certains types de sols, notamment les sols andiques (Tableau 2). La typologie des sols intègre les propriétés minéralogiques des sols de façon discrète, or il a été montré que dans les sols andiques, les proportions de phases minéralogiques participant à la stabilisation de la matière organique étaient variables, et contrôlaient de façon linéaire les teneurs et stocks de COS (Allo, 2019 ; Basile-Doelsch et al., 2005 ; Chevallier et al., 2019). En Guadeloupe, la relation quantitative entre minéralogie des sols et teneurs en COS a été étudiée sur une population d’Andosols, le long d’un gradient altitudinal ; cette relation est traitée dans la section 3.3.

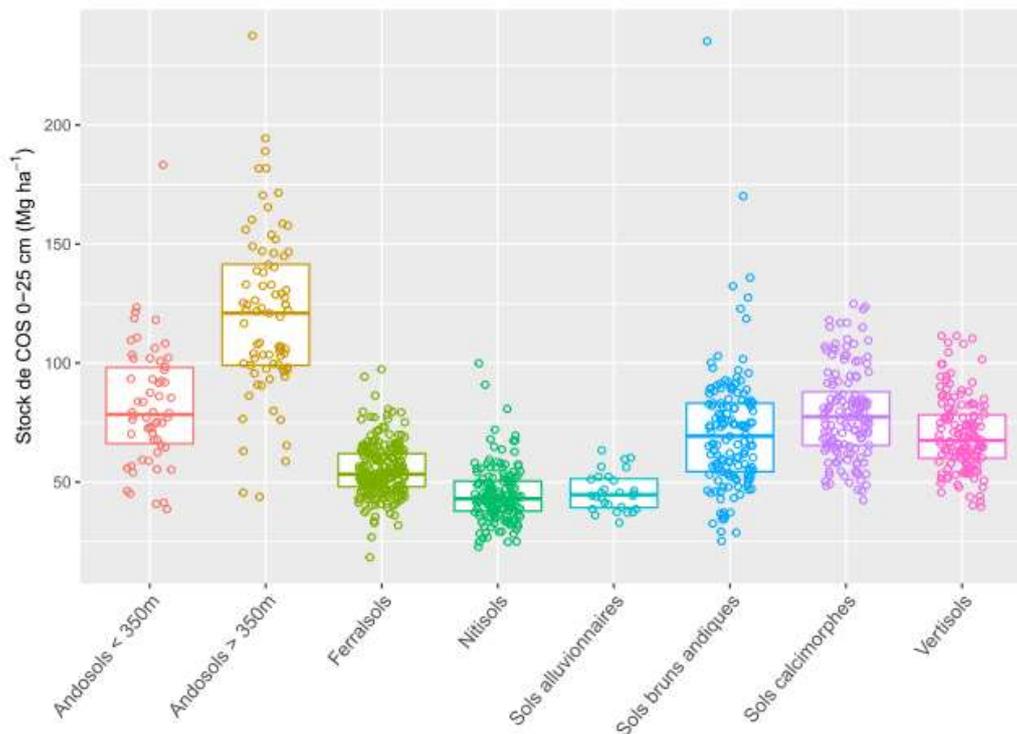


Figure 8. Stocks de COS selon le type de sol en Guadeloupe (source des données : BDD TropEmis & CaribAgro, Rochette et al., 2019)

Les types de sols présents dans la BDD ont été simplifiés ; la correspondance entre les deux typologies est indiquée en 37.

Type de sol	n	Stocks de COS (Mg ha ⁻¹)			
		Moyenne ± écart-type	CV (%)	Médiane	Min, Max
Andosols < 350 m	58	82.1 ^b ± 25.4	30.9	78.4	38.6, 183.3
Andosols > 350 m	77	120.7 ^a ± 34.8	28.8	121.0	43.7, 237.6
Ferralsols	249	54.9 ^d ± 10.8	19.7	53.3	18.4, 97.4
Nitisols	153	44.7 ^e ± 11.8	26.4	43.0	22.7, 99.9
Sols alluvionnaires	28	45.9 ^{de} ± 8.0	17.4	44.7	32.9, 63.3
Sols bruns andiques	149	70.9 ^c ± 26.0	36.7	69.3	25.2, 235.2
Sols calcimorphes	144	78.5 ^b ± 18.8	23.9	77.4	42.4, 124.9
Vertisols	146	70.0 ^c ± 15.5	22.1	67.5	39.6, 111.4

Tableau 2. Statistiques descriptives des stocks de COS selon le type de sol en Guadeloupe (source des données : BDD TropEmis & CaribAgro, Rochette et al., 2019)

Les lettres figurant en exposant correspondent aux groupes statistiques déterminés par Anova et test de Tukey au seuil $p < 0.05$. n désigne le nombre d'échantillons.

3.3 Stocks de COS selon l'altitude

L'effet de l'altitude sur les stocks de COS a été spécifiquement étudié en Guadeloupe dans le cas des Andosols présents dans le sud de Basse-Terre, développés sur des dépôts volcaniques récents et cultivés en banane ou maraîchage. Comme cela a été montré plus haut (section 3.2), les stocks de COS sont plus élevés pour les Andosols présents à une altitude > 350m que pour les Andosols présents à une altitude < 350 m. L'étude de Sierra et Causeret (2018) a permis de mettre en évidence l'effet de l'altitude sur la variation des stocks de COS, à l'aide d'une approche de modélisation permettant d'estimer les entrées de carbone (via les résidus aériens et souterrains des plantes cultivées) et les sorties de carbone (reliées à la constante de minéralisation de la matière organique, appelée k_{soc}) le long du gradient altitudinal³. Si les rendements de banane décroissent avec l'altitude, se traduisant par une diminution des entrées de carbone de 44%, la constante de minéralisation de la matière organique décroît de manière encore plus marquée (570%) le long de ce gradient (Figure 9). Ces résultats montrent ainsi que dans ce contexte volcanique et montagneux, l'augmentation de l'altitude se traduit par une pluviosité plus importante, déterminant la formation d'allophanes, qui exercent une importante stabilisation de la matière organique dans les Andosols (Figure 10), leur conférant des stocks de COS élevés malgré des entrées de carbone plus faibles qu'à basse altitude.

³ La démarche de simulation des stocks de COS en Guadeloupe est développée en section 4.1.2.

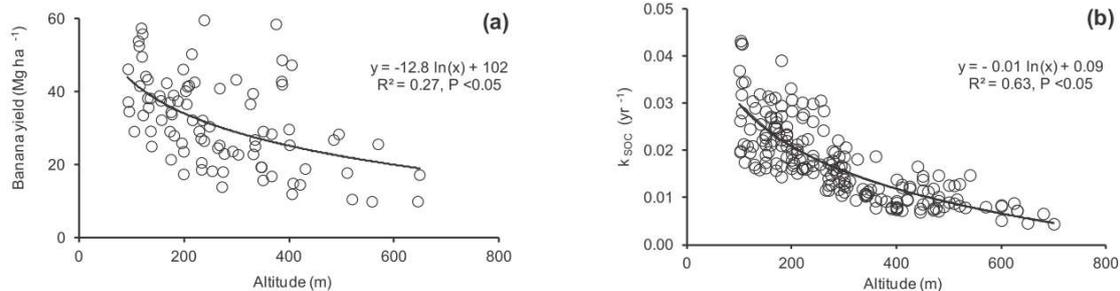


Figure 9. Effet de l'altitude sur les rendements de banane (a) et sur la constante de minéralisation du carbone du sol (k_{soc}) (b) dans les Andosols du sud de Basse-Terre (Sierra and Causeret, 2018)

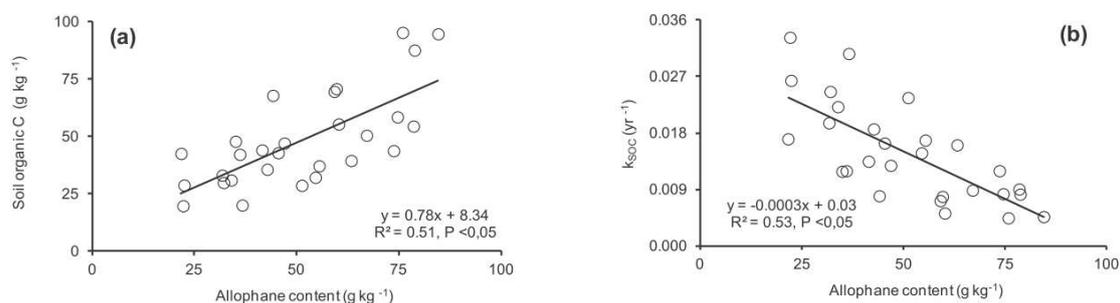


Figure 10. Effet de la teneur en allophanes sur la teneur en carbone du sol (a) et sur la constante de minéralisation du carbone du sol (k_{soc}) (b) dans les Andosols du sud de Basse-Terre (Sierra and Causeret, 2018)

3.4 Stocks de COS selon les propriétés chimiques des sols

La variabilité des stocks de COS a été étudiée dans les monocultures de banane du sud de Basse-Terre (Blanchart et al., 2004 ; Clermont-Dauphin et al., 2004). Cette étude a mis en évidence l'effet positif des charges variables (différence entre le pH_{eau} et le pH_{KCl}) sur les stocks de COS, dans les Andosols et Nitisols.

L'état des charges variables est conditionné par la teneur en carbone organique mais également le pH, lui-même influencé par la teneur en Ca des sols. La teneur en Ca contribuerait donc à la stabilisation de la matière organique dans ces sols.

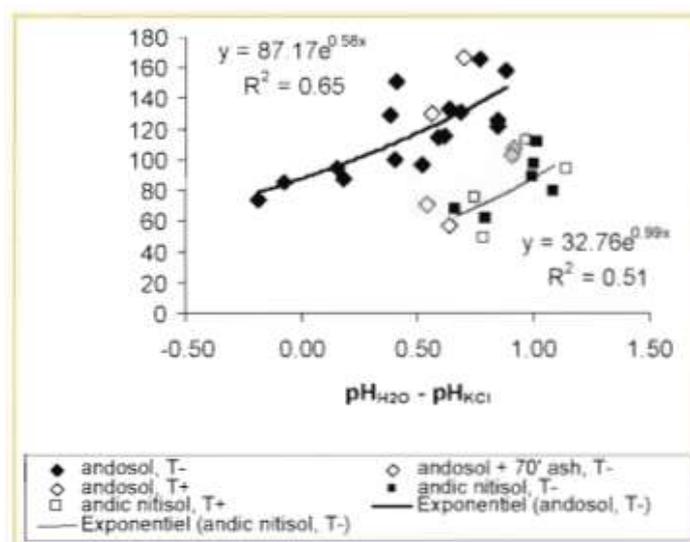


Figure 11. Relation entre état des charges variables et stocks de COS des sols sur 0-30 cm, en Mg ha^{-1} , dans des sols cultivés en banane dans le sud de Basse-Terre (Blanchart et al., 2004)

3.5 Stocks de COS selon l'usage des sols

La base de données TropEmis-CaribAgro a été utilisée pour évaluer l'effet de l'usage sur les stocks de COS en Guadeloupe, en tenant compte de quelques limites : d'une part tous les usages ne sont pas représentés dans la base (absence des forêts et sous-représentation des prairies), d'autre part les plantes cultivées renseignées dans la base correspondent aux plantes cultivées au moment du prélèvement de sol. Cela n'est pas problématique pour les monocultures (canne, banane, vergers, prairies), mais certaines cultures annuelles (ananas, maraîchage, tubercules, melon) peuvent faire l'objet de rotations, rendant plus difficile l'analyse de l'effet des cultures sur les stocks de COS. Etant donné la nature exclusivement agricole de la BDD TropEmis-CaribAgro, ce n'est pas l'usage au sens strict (l'utilisation socio-économique des terres) qui est analysé ici, mais plutôt le type de culture.

La représentation des stocks de COS selon le type de sol et l'usage montre qu'à l'échelle globale de la Guadeloupe, il n'est pas possible de différencier les stocks de COS selon les cultures (Figure 12). Il subsiste une variabilité trop importante au sein de chaque type de sol pour mettre en évidence des différences de stocks entre cultures. Sierra et Desfontaines (2018b) ont également observé que les teneurs et stocks de COS des sols étaient contrôlés par le type de sol mais pas par le type de culture, sur 69 parcelles issues de la BDD TropEmis-CaribAgro. Dans un contexte régional caribéen (Porto-Rico et les Iles Vierges), Vaughan et al. (2019) ont également montré que l'usage du sol était un déterminant peu important des stocks de COS, contrairement au type de sol. En Guadeloupe, il est difficile de mettre en évidence l'effet de l'usage du sol à l'échelle régionale, en raison de l'hétérogénéité des stocks de COS subsistant dans chaque combinaison solxusage. En revanche, à l'échelle de la parcelle, les changements d'usage peuvent entraîner une augmentation ou une diminution des stocks de COS. Ces effets sont traités dans la partie 4 de cette synthèse.

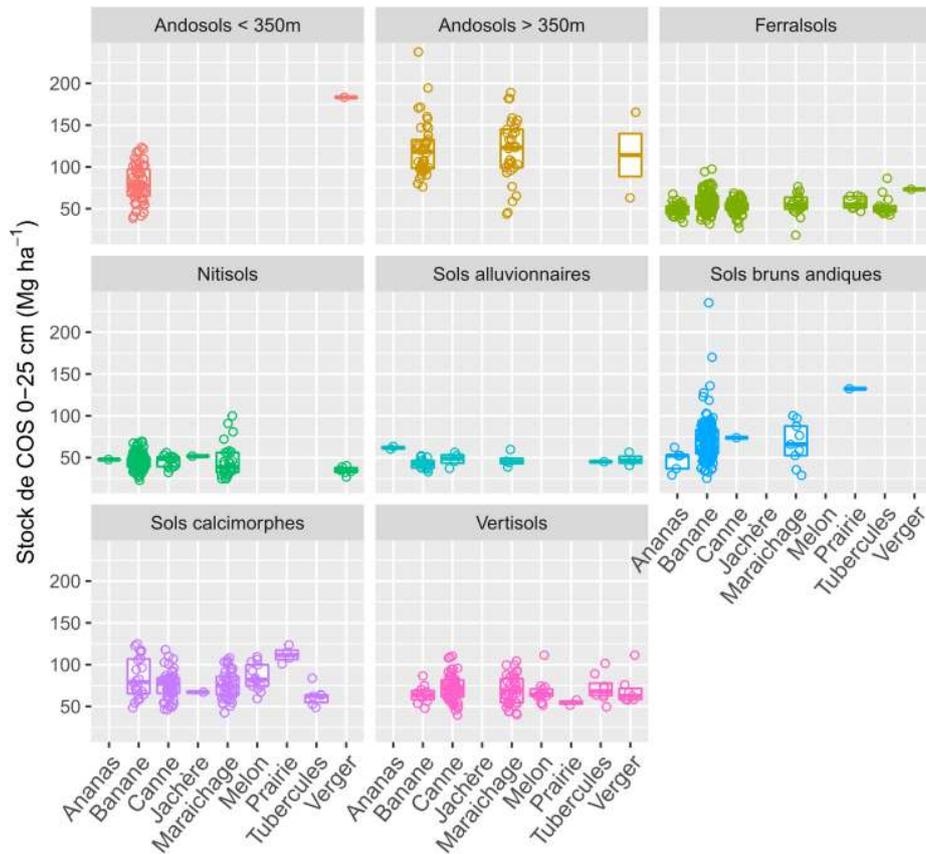


Figure 12. Stocks de COS selon le type de sol et l'usage en Guadeloupe (source des données : BDD TropEmis & CaribAgro, Rochette et al., 2019)

3.6 Spatialisation des stocks de COS

La spatialisation des stocks de COS n'a pas été réalisée en Guadeloupe. Le projet TropEmis s'étant focalisé sur les sols cultivés en cultures pérennes et annuelles et ayant pour objectif la calibration d'un modèle de dynamique des stocks de COS, la BDD constituée au cours du projet ne couvre donc pas l'ensemble du territoire, et certains usages sont sous-échantillonnés (les prairies) ou absents de la BDD (les forêts). Il est néanmoins possible de cartographier les points de la BDD TropEmis-Carib Agro avec les stocks de COS associés à ces points (Figure 13). La variabilité des stocks de COS observée peut être interprétée au regard de la distribution des types de sols. Les stocks de COS les plus élevés (>150 Mg ha^{-1}) se retrouvent dans les hautes altitudes du sud de Basse-Terre, sur des Andosols riches en allophanes. On observe un gradient décroissant des stocks de COS vers le littoral, avec les valeurs de stocks de COS les plus faibles observées pour les Nitisols. Les stocks de COS dans le nord-est de Basse-Terre sont également plutôt faibles, car les Ferralsols sont dominants dans cette région. Les stocks de COS à Grande-Terre présentent des valeurs intermédiaires, les sols de cette région étant des Vertisols ou des Calcisols.

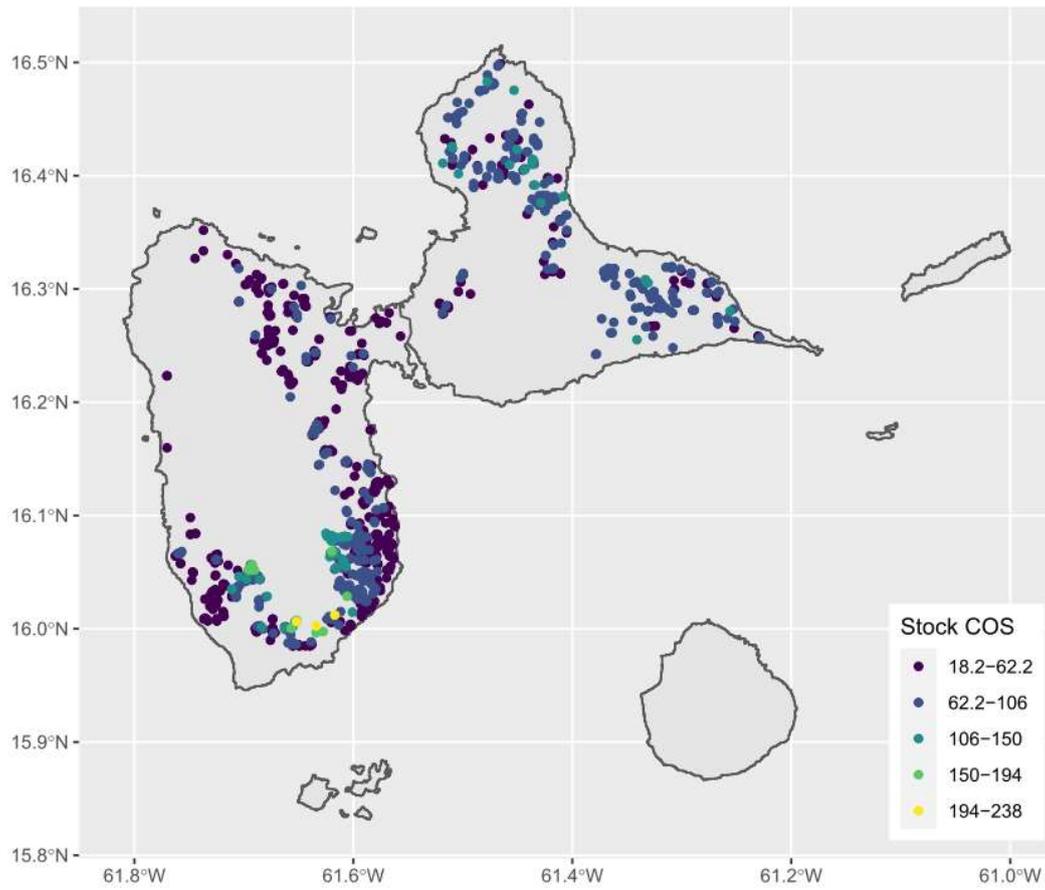


Figure 13. Carte des stocks de COS en Guadeloupe (couche 0-25 cm), exprimés en Mg ha^{-1} (source des données : BDD TropEmis & CaribAgro, Rochette et al., 2019)

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

4.1 Évolution tendancielle des stocks de COS

4.1.1 Évolution observée des stocks de COS

L'évolution tendancielle des stocks de COS, qui correspond à la variation des stocks de COS en l'absence de changement d'usage ou de changement de mode de gestion des sols observés actuellement, a été mise en évidence en Guadeloupe par Sierra et al. (2015a), en analysant les variations de stocks de COS dans des parcelles issues de la BDD CaribAgro-TropEmis et échantillonnées à plusieurs reprises entre 1998 et 2014 (analyse diachronique).

L'étude de ces variations met en avant deux grandes tendances selon l'usage des sols : les stocks de COS des sols des cultures dites de diversification (maraîchage, ananas, tubercules, melon) présentent une tendance à la baisse (Figure 14a), comprise entre -1.6 \% an^{-1} et -0.1 \% an^{-1} (Sierra et al., 2015a). Dans les systèmes de cultures destinées à l'export (cultures pérennes de banane ou canne), des tendances contrastées sont observées selon les situations (Figure 14a), avec de faibles baisses des stocks de COS, jusqu'à des augmentations de 0.8 à 0.9 \% an^{-1} (Sierra et al., 2015a).

Ces différences selon l'usage sont expliquées par de moindres apports de C dans les systèmes de diversification, et par l'intensité du travail du sol (nombre de passage d'outils par unité de temps) plus élevée dans ces systèmes.

Les conditions pédoclimatiques influencent les variations observées : dans le cas des monocultures de banane (Figure 14b), d'une part la probabilité d'assister à une diminution tendancielle des stocks de COS augmente avec les stocks de COS initiaux, et d'autre part, les sols de la région AER2 (Ferralsols sous climat humide, dans le nord de Basse-Terre) sont plus sensibles à la diminution des stocks de COS que les sols de la zone AER3 (Andosols sous climat hyper-humide, dans le sud de Basse-Terre), illustrant l'effet de la minéralisation de la matière organique des sols plus faible dans les Andosols des régions humides.

Pour les systèmes de diversification, les baisses de stocks de COS observées sont plus importantes dans les régions humides (AER2, 3, et 4, situées à Basse-Terre) que dans les régions sèches (AER1, située à Grande-Terre). Ces différences peuvent être expliquées par différentes raisons selon les situations, telles que i) des stocks de COS initiaux plus élevés dans les régions humides ; ii) des apports de C par les résidus de culture plus faibles dans les Ferralsols (région humide) que les Vertisols (région sèche).

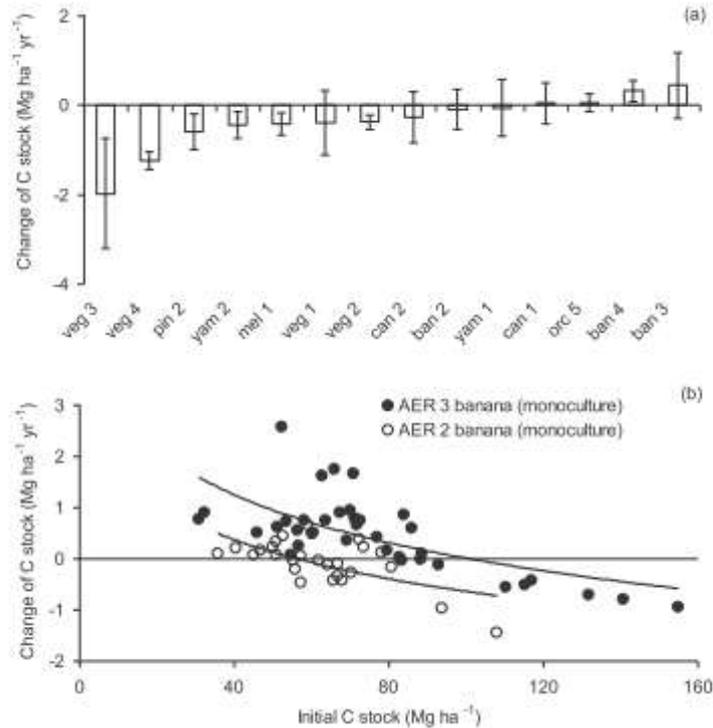


Figure 14. Variations de stocks de COS observées en Guadeloupe, pour différents systèmes de culture, selon la zone agropédoclimatique (Sierra et al., 2015a)

Les numéros correspondent aux zones agropédoclimatiques décrites en Figure 7.

Codes des différentes cultures : veg : maraîchage ; pin : ananas ; yam : tubercules ; mel : melon ; can : canne à sucre ; ban : banane ; orc : vergers (a), et pour des bananeraies selon le stock de COS initial et la zone agropédoclimatique (b)

4.1.2 Simulation des variations de stocks de COS observées

4.1.2.1 Paramétrisation et validation du modèle MorGwanik

L'un des objectifs principaux du projet TropEmis a été la mise au point d'une méthode de modélisation mécaniste, permettant de simuler les variations observées des stocks de COS en Guadeloupe, afin de modéliser les trajectoires futures des stocks de COS selon des scénarios *business-as-usual*, et des scénarios de changement climatique, changement d'usage, et changement de pratiques de gestion. Le modèle créé au cours du projet TropEmis, appelé MorGwanik, est une adaptation du modèle AMG (Andriulo et al., 1999) pour les conditions agropédoclimatiques de la Guadeloupe. Ce modèle a ensuite été utilisé dans plusieurs travaux de modélisation des variations de stocks de COS en Guadeloupe sous l'effet des changements d'usage et de pratiques de gestion (Chopin and Sierra, 2021, 2019 ; Sierra et al., 2017, 2016).

La stratégie de paramétrage du modèle pour les conditions de Guadeloupe est décrite dans Sierra et al. (2015a). Le modèle peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dC_{soil}}{dt} = (C_{res} \times h_{res}) + (C_{ame} \times h_{ame}) - [C_{soil} \times (k_{aer} \times k_{crop})]$$

où $\frac{dC_{soil}}{dt}$ est la variation temporelle du stock de COS, C_{res} est la quantité de C arrivant au sol par les plantes (parties aériennes et souterraines), C_{ame} est la quantité de C arrivant au sol issue des amendements organiques, h_{res} et h_{ame} sont les taux d'humification des apports de C provenant

respectivement des plantes et des amendements organiques, C_{soil} est le stock de COS, k_{aer} est la constante de minéralisation spécifique à la région agropédoclimatique, et k_{crop} est la constante de minéralisation spécifique au système de culture en place.

Les taux d'humification des résidus de culture et des amendements organiques (h_{res} et h_{ame}) ont été obtenus à partir de travaux antérieurs (Brisson et al., 2003 ; Raphael et al., 2012 ; Ripoche et al., 2008 ; Sierra, 2014), et n'ont pas fait l'objet de calibration dans cette étude.

En revanche, le paramètre k (coefficient de minéralisation du pool de C actif) a été calibré au cours du projet TropEmis, et divisé en deux composantes : une composante liée aux conditions pédoclimatiques (k_{aer}) et une composante liée au système de culture, et principalement à l'intensité du travail du sol (k_{crop}). Ces paramètres ont été estimés pour les 5 zones agropédoclimatiques de Guadeloupe. La calibration de k_{aer} et k_{crop} a été réalisée en exploitant une partie de la BDD TropEmis-CaribAgro, sur des parcelles où étaient renseignées le système de culture en place, les rendements, les apports d'amendements organiques, la gestion des résidus de culture, et pour lesquelles le stock de COS était connu. k_{aer} et k_{crop} ont été ajustés sur une partie des données (jeu de calibration, 159 parcelles) afin de minimiser l'écart entre le stock de COS observé et le stock de COS prédit par le modèle. Les paramètres ont ensuite été utilisés sur un jeu de validation (94 parcelles).

Les performances du modèle MorGwanik sont bonnes ($r^2 > 0.70$) (Figure 15) et permettent donc l'utilisation de ce modèle pour prédire les variations de stocks de COS en Guadeloupe sous l'effet de changements du climat, des usages, et des modes de gestion.

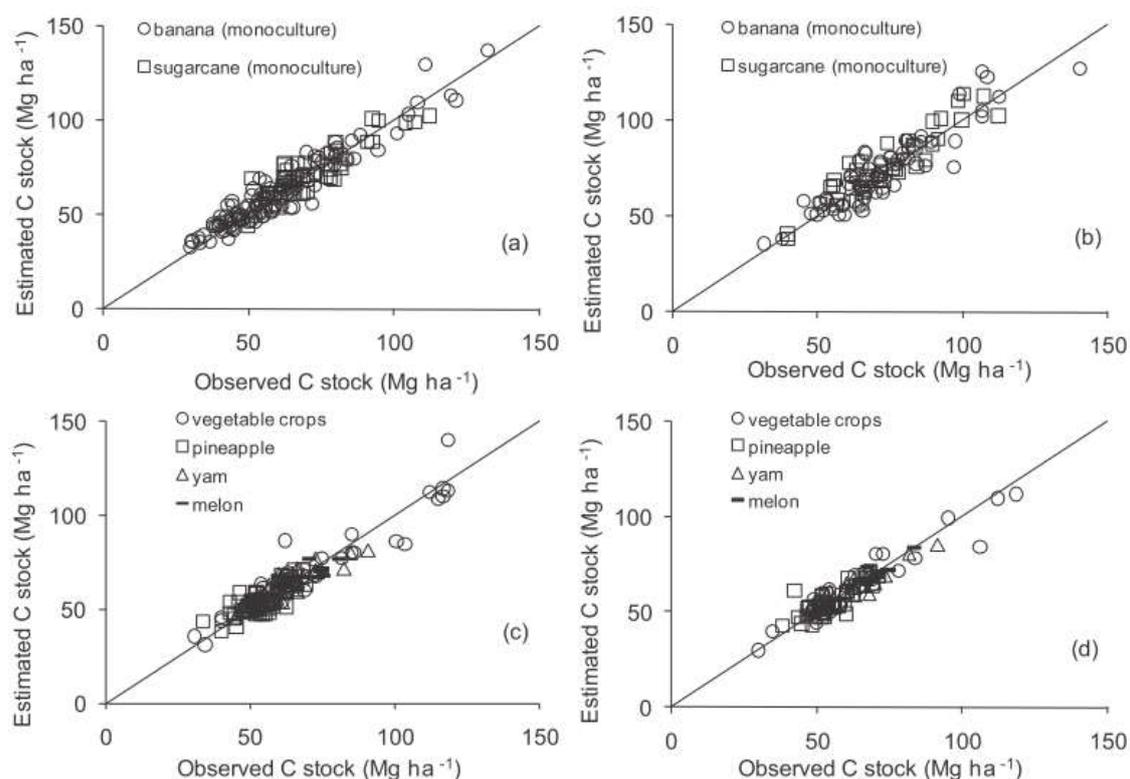


Figure 15. Stocks de COS observés et simulés par le modèle MorGwanik pour différentes plantes cultivées en Guadeloupe (Sierra et al., 2015a)

(a) et (c) : jeu de données de calibration ; (b) et (d) : jeu de données de validation

Contrairement à d'autres modèles pour lesquels les variables climatiques et les propriétés des sols constituent des variables d'entrée de ceux-ci, MorGwanik intègre l'effet du climat et du sol au sein du paramètre k_{aer} . Pour simuler l'effet du changement climatique sur l'évolution des stocks de COS, il est donc nécessaire de modifier le k_{aer} en explicitant l'effet du changement de température ou de précipitations sur la cinétique de minéralisation du COS (Chopin and Sierra, 2019).

4.1.2.2 Simulation des évolutions tendanciennes des stocks de COS, effet du changement climatique

Dans la lignée des résultats de Sierra et al. (2015a) sur les trajectoires des stocks de COS observées en Guadeloupe, Chopin and Sierra (2019) ont simulé à l'aide du modèle MorGwanik l'évolution des stocks de COS sur la période 2015-2045, dans les cinq zones agropédoclimatiques et pour deux grands types de production : les cultures pérennes destinées à l'exportation (canne, banane), et les cultures de diversification pour le marché local (maraîchage, tubercules, ananas, melon). Les simulations ont été effectuées selon deux scénarios climatiques : un scénario avec le climat actuel, et un scénario de changement climatique pour le XXI^{ème} siècle (A1B IPCC-scénario), qui se traduit en Guadeloupe par une augmentation des températures de 0,7 °C, et sans modification du régime des pluies. L'effet de cette augmentation de la température se traduit par deux phénomènes pris en compte dans la stratégie de modélisation : i) une augmentation de la minéralisation de la matière organique du sol, et ii) une modification des entrées de C arrivant au sol par les résidus de culture (augmentation de 3,7% pour les plantes en C3, et diminution de 7,4 % pour les plantes en C4 sur la période 2015-2045). Les résultats de ces simulations montrent que la plupart des systèmes de production destinés à l'export (cultures pérennes) stockeraient du COS sur la période 2015-2045, tandis que la plupart des systèmes destinés au marché local (cultures annuelles) déstockeraient du COS (Figure 16). Les variations de stocks de COS sont plus déterminées par les systèmes de production que par l'effet du changement climatique. Le changement climatique induit néanmoins un déclin des stocks de COS pour l'ensemble des situations testées, montrant que l'augmentation possible des apports de C par les résidus de culture sous l'effet de l'augmentation de la température ne compense pas l'augmentation de la vitesse de minéralisation de la matière organique.

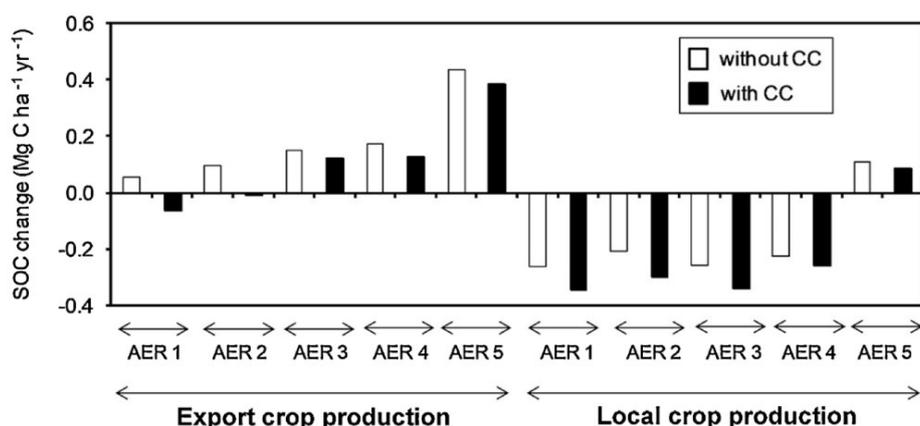


Figure 16. Variations annuelles des stocks de COS simulées sur la période 2015-2045 selon le type de production (cultures pérennes d'export ou cultures de diversification à destination du marché local), la zone agropédoclimatique (AER), et la prise en compte de l'effet du changement climatique (CC) (Chopin and Sierra, 2019)

A l'échelle régionale et en tenant compte de la superficie de chaque région, les deux scénarios avec ou sans prise en compte de l'effet du changement climatique conduiraient à un déstockage de COS (Tableau 3). Le scénario sans changement climatique entraînerait un déstockage de COS dans les régions 1 et 3 sur la période 2015-2045, tandis que les régions 2,4, et 5 stockeraient du COS (Tableau 3). Selon le scénario avec changement climatique, seules les régions 4 et 5 stockeraient du COS, régions dans lesquelles les systèmes de production sont dominés par des cultures de banane ou de vergers amendés en matières organiques. Les régions 1 et 2 seraient particulièrement touchées par l'effet du changement climatique, avec des diminutions importantes des stocks de COS simulés. Ces diminutions marquées s'expliquent par la superficie importante de ces régions (la région 1 correspond à la majeure partie de Grande-Terre, tandis que la région 2 correspond à une grande région agropédoclimatique du nord de Basse-Terre) et par la présence importante de la canne à sucre dans

ces régions, dont les restitutions de C par les résidus de culture sont négativement impactées par le changement climatique (plantes en C4). Chopin and Sierra (2019) notent cependant que le modèle est fortement sensible aux paramètres biophysiques de la canne à sucre utilisés ; des changements de cultivars pourraient modifier de façon importante les variations simulées de stocks de COS à l'échelle régionale.

AER	SOC change	
	Without CC Mg C yr ⁻¹	With CC
1	-342	-1685
2	21	-459
3	-10	-65
4	181	99
5	79	66
Total	-71	-2044

Tableau 3. Variations de stocks de COS simulées à l'échelle régionale sur la période 2015-2045, avec ou sans simulation de l'effet du changement climatique (CC) (Chopin and Sierra, 2019)

Les AER sont les régions agropédoclimatiques définies au cours du projet TropEmis (voir partie 2.6).

4.2 Effets des changements d'usage des sols sur les stocks de COS

En Guadeloupe, l'effet des changements d'usage sur les stocks de COS a été évalué dans le cas des transitions entre cultures d'exportation (pérennes) et cultures destinées au marché local (cultures annuelles dites de diversification), cette transition ayant été identifiée au cours du projet TropEmis comme d'actualité en Guadeloupe (Chopin and Sierra, 2019 ; Sierra et al., 2015).

Les effets de ces changements d'usage ont été évalués à l'aide des stocks de COS mesurés de façon diachronique sur des parcelles de la BDD TropEmis-CaribAgro, mais également par une approche de modélisation mécaniste à l'aide du modèle MorGwanik, développé pour le contexte agropédoclimatique guadeloupéen.

4.2.1 Effet observé des transitions entre cultures pérennes et cultures annuelles

Quelques parcelles dont les données sont présentes dans la BDD TropEmis-CaribAgro ont été soumises à des changements d'usage et les stocks de COS de ces parcelles ont été mesurés avant et après ces changements (analyse diachronique) (Figure 17). La transition d'une culture de canne à sucre vers des cultures maraîchères et de tubercules dans la région agropédoclimatique 1 (Vertisols sous climat sub-humide à Grande-Terre) a provoqué une diminution du stock de COS de 11% en 4 ans (soit 2,75 % an⁻¹), tandis que la transition d'une culture de bananes vers une culture d'ananas dans la région 2 (Ferralsols sous climat humide au nord de Basse-Terre) a entraîné une diminution du stock de COS de 15% en 6 ans (soit 2,5 % an⁻¹). Ces diminutions de stocks de COS sont attribuées à la fois à la réduction des apports de C dans les systèmes de cultures annuels, et à l'augmentation de la minéralisation du COS sous l'effet du travail du sol plus fréquent et plus intense dans ces systèmes annuels. Les variations observées dans ces situations sont exprimées à profondeur de sol équivalente (0-25 cm), et ne prennent pas en compte d'éventuels changements de densité apparente. Ces changements de densité apparente entraînent des différences entre les masses de sols prises en compte dans les

calculs de stocks de COS, pouvant ainsi conduire à une sous-estimation ou une surestimation de l'effet réel du changement d'usage sur les variations de stocks de COS (Ellert and Bettany, 1995).

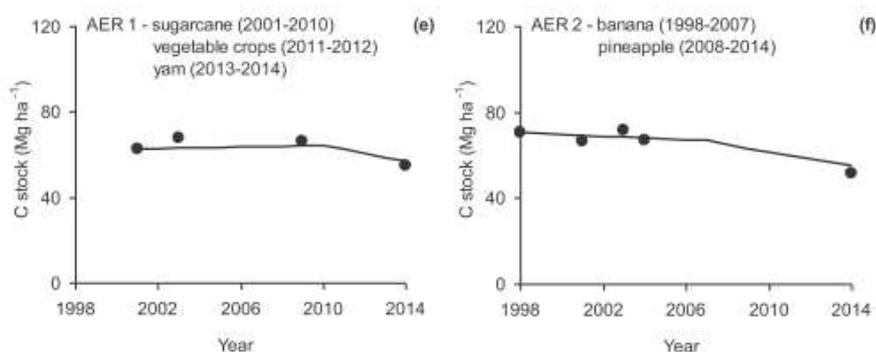


Figure 17. Effet des changements d'usage (cultures pérennes vers annuelles) sur les stocks de COS (couche 0-25 cm) observés dans deux parcelles agricoles en Guadeloupe (Sierra et al., 2015).

4.2.2 Effet simulé des transitions entre cultures pérennes et cultures annuelles

L'effet sur les stocks de COS des transitions des cultures pérennes vers des cultures annuelles a été simulé à l'aide du modèle MorGwanik dans différents contextes (Chopin and Sierra, 2021, 2019 ; Sierra et al., 2015a).

La substitution de cultures de canne à sucre par des cultures maraîchères a été simulée par Sierra et al. (2015a) dans trois situations issues des régions agropédologiques n° 1 et 2. A la fin des 5 années de maraîchage, la variation simulée des stocks de COS dans la couche 0-25 cm était comprise entre -5,2 et -6,2 % du stock de COS initial (soit respectivement -1,04 et -1,24 % an⁻¹), en l'absence d'amendements organiques dans les cultures maraîchères (Tableau 4). L'apport nécessaire de compost pour maintenir le niveau initial de stock de COS a également été simulé, et atteint en moyenne 10 Mg ha⁻¹ an⁻¹ (exprimé en matière fraîche, avec une teneur en eau de 50% et une teneur en C de 33 g kg⁻¹ de compost sec; 1 Mg de compost frais équivaut donc à 0.167 Mg de C). Cela constitue une valeur inatteignable à l'échelle de la Guadeloupe compte tenu des surfaces importantes cultivées en canne dans ces deux régions (Grande-Terre et nord de Basse-Terre) et de la production actuelle de compost. L'apport nécessaire de compost a également été évalué dans l'hypothèse d'une réduction de l'intensité du travail du sol dans les cultures maraîchères, qui abaisserait la constante de minéralisation de la matière organique liée au système de culture à un niveau équivalent de celui estimé pour les cultures d'ananas. Avec cette hypothèse, les apports nécessaires de compost pour maintenir les stocks de COS atteindraient 23 000 Mg an⁻¹, ce qui est proche de la production actuelle de compost en Guadeloupe. Ces simulations suggéreraient que l'intensité du travail du sol dans les cultures annuelles détermine de façon importante les variations de stocks simulés dans ces systèmes.

AER ^a	Sugarcane yield Mg ha ⁻¹	SOC loss ^b % of the initial stock	Compost rate to achieve equilibrium ^c $k_{crop} = 1.19^d$ Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹	$k_{crop} = 0.95^e$
1	65	-5.6	11.5	4.0
2	55	-6.2	7.8	1.5
2	64	-5.2	6.6	0.2

^a Agro-ecological region.

^b SOC loss at the end of the simulated rotation cycle without organic amendment or reduced tillage.

^c Annual rate of compost application to vegetable crops required to maintain the initial C stocks (i.e. to avoid SOC losses).

^d Corresponds to the value estimated for vegetable crops.

^e Correspond to the value estimated for pineapple and used to simulate reduced soil tillage.

Tableau 4. Simulation de l'effet sur les stocks de COS d'une rotation de canne à sucre (5 ans) et de maraîchage (5 ans) dans deux régions agropédo-climatiques (AER) en Guadeloupe (Sierra et al., 2015a)

Chopin and Sierra (2019) ont simulé à l'échelle de la Guadeloupe sur la période 2015-2045 l'effet d'une augmentation de 50% de la surface consacrée aux systèmes de cultures annuels, aux dépens des cultures pérennes, dans un scénario de changement climatique (A1B IPCC), avec deux modalités d'utilisation d'amendements organiques (apports observés actuellement vs doublement des surfaces amendées avec les taux d'apports observés actuellement) et deux modalités d'intensité du travail du sol (labour vs travail du sol par disques).

Les résultats de ces simulations montrent que dans l'ensemble des scénarios, la transition des systèmes pérennes vers des systèmes annuels entraîne une baisse plus marquée des stocks de COS que dans le scénario *business-as-usual* (-0.15% an⁻¹ dans le scénario *business-as-usual*, -0.32% an⁻¹ dans le scénario identique mais avec transition vers des systèmes annuels) (Figure 18). La mise en place de pratiques de gestion favorables au stockage du COS (apports d'amendements organiques et réduction du travail du sol) permet de limiter l'effet du changement d'usage sur la baisse des stocks de COS. Dans le scénario qui combine ces pratiques, les stocks de COS simulés diminuent faiblement (-0.03% an⁻¹), ce qui constitue une baisse plus faible que celles simulées dans le scénario sans changement d'usage mais avec une moindre adoption de ces pratiques. La mise en place de certaines pratiques de gestion dans les cultures annuelles permettrait donc de limiter l'effet négatif des changements d'usage vers ces systèmes en Guadeloupe.

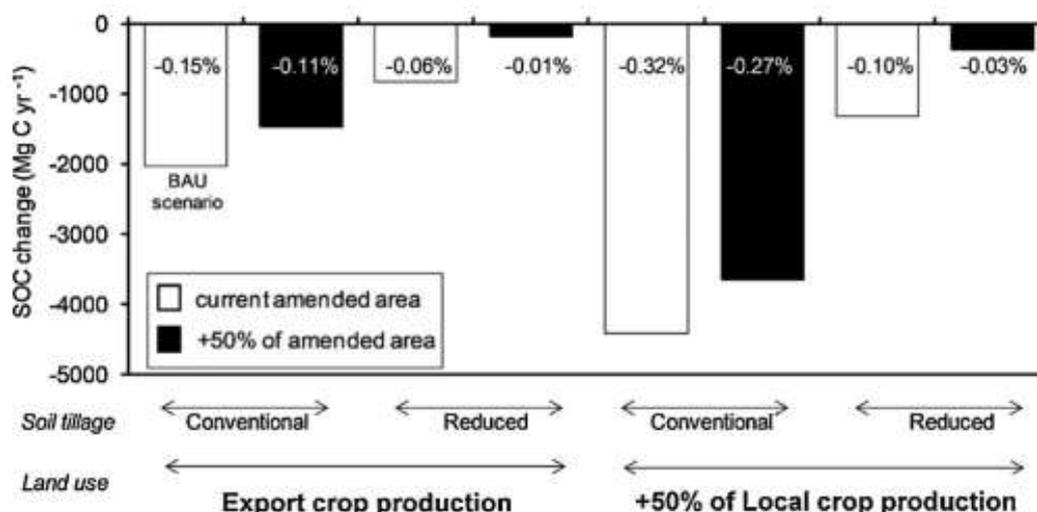


Figure 18. Variations simulées des stocks de COS en Guadeloupe sous l'effet de changements d'usage sous scénario de changement climatique (A1B IPCC), et selon deux modalités d'intensité du travail du sol, et deux modalités d'apports organiques exogènes (Chopin and Sierra, 2019)

BAU correspond au scénario *business-as-usual* (maintien des surfaces destinées aux cultures pérennes d'export, sans changement des pratiques de gestion). Les valeurs exprimées en % et mentionnées dans l'histogramme correspondent à la variation annuelle des stocks de COS par rapport au stock de COS initial.

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

5.1.1 Banane

L'effet des pratiques de gestion dans les monocultures de banane sur les stocks de COS n'a pas été spécifiquement étudié en Guadeloupe. Les résultats du projet TropEmis montrent cependant que les pratiques conventionnelles pratiquées en Guadeloupe permettent le maintien voire l'augmentation des stocks de COS, dès lors que les stocks de COS initiaux ne sont pas extrêmement élevés (Figure 14, Sierra et al. (2015b)). Les résidus de culture sont laissés au sol et le travail du sol n'est que ponctuel, au moment de la plantation ; ces deux pratiques favorisent donc le stockage de COS. En revanche, le recours aux intrants de synthèse est très important, la fertilisation minérale dans les systèmes bananiers contribue donc de façon significative au bilan gaz à effet de serre de la filière (Svanes and Aronsson, 2013).

5.1.2 Canne à sucre

Les pratiques de gestion actuellement pratiquées en Guadeloupe dans les monocultures de canne à sucre (restitution des résidus de culture, travail du sol peu fréquent, une fois tous les cinq ans au moment de la replantation) entraîne soit une faible baisse des stocks de COS dans la région agropédoclimatique n°1 (Ferralsols du nord de Basse-Terre), soit une très faible augmentation des stocks de COS dans la région n°2 (Vertisols de Grande-Terre) (Figure 14). A l'échelle globale de la Guadeloupe, les stocks de COS sous canne à sucre sont donc à l'équilibre, mais menacés par un effet négatif du changement climatique (voir section 4.1.2.2).

Il semble difficile de jouer sur le levier du travail du sol afin d'augmenter les stocks de COS sous canne à sucre : le travail du sol au moment de la replantation est en effet nécessaire pour la restauration de la macroporosité du sol (Cruz and Guillaume, 1999).

En revanche, le chaulage des sols acides (Ferralsols du nord de Basse-Terre) pourrait être une pratique de gestion favorisant le stockage de COS dans les systèmes de canne à sucre, en raison d'une augmentation du rendement en canne, et donc des restitutions de C par les résidus de culture, dans les sols chaulés (Sierra et al., 2015a, 2015b). A l'échelle globale, le bilan gaz à effet de serre du chaulage des sols acides serait néanmoins neutre, en raison des émissions de CO₂ liées à la dissolution des carbonates une fois apportés au sol, et à l'extraction et au transport des roches carbonatées (Wang et al., 2021).

L'effet de l'exportation de la biomasse de canne a été étudié en Guadeloupe dans le cadre de l'évaluation de l'implantation de cultures de canne à destination de la filière énergie sur des sols pollués à la chlordécone, impropres aux cultures à destination de l'alimentation (Sierra et al., 2016). Les transitions étudiées (canne à sucre vers canne énergie et banane vers canne énergie) constituent donc des changements d'usage, cependant l'étude a évalué l'effet de différents niveaux d'exportation de la biomasse de canne énergie sur les stocks de COS. L'effet de l'export de la biomasse de canne a été simulé par le modèle MorGwanik, selon trois modalités : i) export total de la biomasse aérienne de canne ; ii) estimation de la quantité de canne exportée permettant de maintenir les stocks de COS ; et iii) estimation de la quantité de compost apporté tous les cinq ans et permettant de maintenir les

stocks de COS en cas d'export total de la biomasse aérienne de canne. Les résultats de ces simulations montrent qu'un export total de la biomasse de canne (81.6 Mg ha^{-1} de matière sèche) fait baisser les stocks de COS de manière importante (27% en 30 ans avec des parcelles de canne à sucre comme référence, 19 % en 30 ans avec des parcelles de banane en référence) (Figure 19). La quantité nécessaire de C apporté par restitution partielle de la biomasse aérienne de canne pour maintenir les stocks de COS est de $4.0 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour la parcelle précédemment occupée par la canne à sucre, et de $2.5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour celle précédemment occupée par la banane, correspondant à respectivement 12.5 et 7.7 % de la biomasse récoltable de canne énergie. La quantité nécessaire de compost apporté tous les 5 ans pour maintenir les stocks de COS malgré un export total de la biomasse de canne est respectivement de $8.4 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et $5.3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour les parcelles précédemment sous canne à sucre et banane.

Cette étude montre ainsi que le compromis entre valorisation économique de la biomasse et maintien des stocks de COS peut être atteint dans ces systèmes de canne énergie ; les quantités nécessaires de C apporté dans ces systèmes pour maintenir les stocks de COS sont plus faibles lorsque le stock de COS initial est peu élevé.

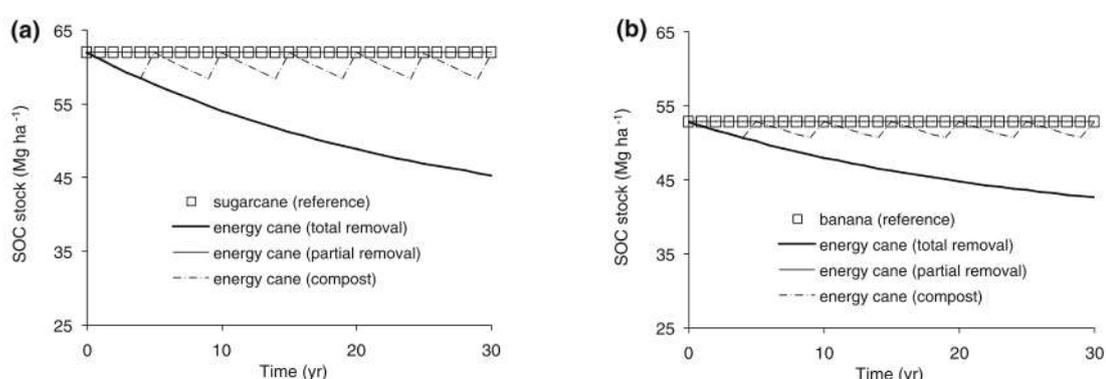


Figure 19. Simulation des variations de stocks de COS dans des systèmes de canne énergie selon deux références (canne à sucre et banane) et trois modalités de gestion : export total de la biomasse récoltable, export partiel de la biomasse récoltable, export total de la biomasse récoltable associé à des apports de compost (Sierra et al., 2016)

5.2 Pratiques de gestion dans les cultures annuelles

Les systèmes comportant des cultures annuelles (ananas, melon, maraîchage, tubercules) ont tendance à déstocker du COS en Guadeloupe, en raison du travail du sol intense et fréquent dans ces systèmes, et des apports de C par les résidus de culture plus faibles que dans les cultures pérennes de canne ou banane.

Comme cela a été montré précédemment, le développement de ces cultures annuelles aux dépens des cultures pérennes entraînerait donc une baisse des stocks de COS, mais cette baisse peut être limitée par le recours aux amendements organiques et à la diminution de l'intensité du travail du sol (Chopin and Sierra, 2019). La réduction de l'intensité du travail du sol présenterait un important potentiel de mitigation de la baisse des stocks de COS, en particulier dans la région pédoclimatique n°1 (nord de Basse-Terre) (Figure 20). Ce changement de pratique induirait la transition du labour par retournement vers des pratiques de travail du sol comme le passage de disques.

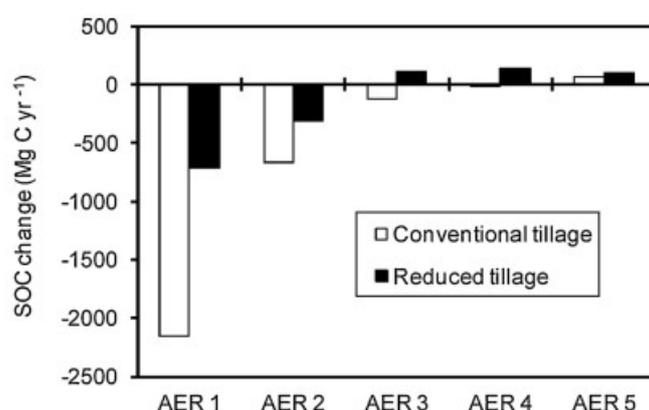


Figure 20. Effet simulé des modalités de travail du sol sur les variations de stocks de COS à l'échelle des régions agropédoclimatiques (Chopin and Sierra, 2019)

L'effet des pratiques de gestion dans des systèmes de diversification comportant des cultures annuelles a été étudié par Sierra et al. (2017), en couplant une analyse de la typologie de ces fermes en Guadeloupe avec une approche de modélisation des stocks de COS sous l'effet des pratiques de gestion. 72 fermes ont été étudiées, au sein desquelles ont été menées des enquêtes pour connaître avec précision les pratiques de gestion employées (rotations, apports d'amendements, fertilisation, travail du sol) et les rendements ; les stocks de COS ont également été mesurés dans les parcelles de ces fermes, dans la couche 0-25 cm. Cinq types de fermes ont été discriminés par ACP (Tableau). Le niveau de stocks de COS mesuré dans ces fermes a été comparé au stock de COS à l'équilibre, dont la valeur a été déterminée par simulation (modèle MorGwanik) pour une situation de référence (canne ou banane) et selon les différentes régions agropédoclimatiques. Les effets des rotations couramment employées dans ces fermes ont ensuite été simulés dans différents contextes agropédoclimatiques (Tableau) sur des périodes de 10, 20, et 30 ans.

Les résultats de cette étude mettent en avant l'effet des pratiques de gestion sur l'évolution des stocks de COS. Au terme des 30 années de simulation, les parcelles des fermes de type 2 (rotation entre prairies et maraîchage) et 5 (cultures maraîchères avec apports d'amendements organiques) voient leurs stocks de COS augmenter par rapport au stock de COS de référence (sous cultures pérennes) (Figure 21). Les pratiques de jachères longues entre les cycles de maraîchage et d'apports de compost ont donc été identifiées comme cruciales dans un objectif d'augmentation des stocks de COS. Afin de maintenir les stocks de COS, la période de jachère entre les cycles de maraîchage devrait être deux fois plus longue que la période de culture maraîchère. Cependant, avec des apports de compost de l'ordre de $4.2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, la durée de la jachère peut être réduite à une durée égale à celle du cycle de maraîchage.

Variable	Farm population		Type 1		Type 2		Type 3		Type 4		Type 5	
	Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV
Farm size (ha)	18	120	10 ^b	65	46 ^a	138	16 ^b	208	10 ^b	80	9 ^b	77
Vegetable crops (%) ^a	50	120	22 ^c	76	20 ^c	58	43 ^b	30	95 ^a	32	90 ^a	18
Fallow (%) ^a	32	44	11 ^b	47	75 ^a	15	55 ^a	28	0 ^c	0	10 ^b	129
Other crops (%) ^a	18	47	67 ^a	18	5 ^b	253	2 ^b	223	5 ^b	179	0 ^b	0
Compost rate (Mg compost ha ⁻¹ yr ⁻¹) ^b	5.0	41	2.5 ^b	28	3.1 ^b	8	4.2 ^b	80	4.6 ^b	16	10.0 ^a	48
Pesticide (applications cycle ⁻¹) ^c	2.1	82	0.7 ^c	117	1.0 ^{bc}	94	2.7 ^b	66	6.1 ^a	21	1.2 ^b	93
Rate of N fertilizer (kg N ha ⁻¹ cycle ⁻¹) ^c	100	73	46 ^b	88	34 ^b	101	122 ^a	54	188 ^a	61	136 ^a	64
Soil tillage (tillage operations cycle ⁻¹) ^c	1.9	110	0.8 ^c	84	0.9 ^c	135	2.4 ^b	98	6.2 ^a	43	0.8 ^c	178
RSOC _{obs}	0.93	26	0.82 ^c	26	1.10 ^a	18	0.90 ^{bc}	23	0.82 ^c	17	1.03 ^{ab}	29

^a % of the rotation occupied by vegetable crops, fallow and other crops.

^b Average compost rate in farms with compost application.

^c Per cycle of vegetable crops.

Tableau 5. Typologie des fermes discriminées par ACP (Sierra et al., 2017)

Type 1 : banane et canne avec diversification ; Type 2 : pâturages extensifs ; Type 3 : polyculture-élevage intensif ; Type 4 : fermes spécialisées intensives avec gestion agrochimique ; Type 5 : fermes spécialisées avec apports importants de compost. RSOC_{obs} correspond au ratio entre le stock de COS mesuré et le stock de C simulé à l'équilibre.

Farm type and AER	Rotation
Type 1 – AER 1	Vegetable crops (2) – fallow (1) – water yam (2) – sugarcane (5)
Type 1 – AER 2	Vegetable crops (2) – fallow (1) – sugarcane (6)
Type 1 – AERs 3 and 4	Vegetable crops (2) – banana (5) – fallow (1)
Type 2 – AERs 1, 3 and 4	Vegetable crops (1) – fallow (4)
Type 3 – AERs 1, 2, 3 and 4	Vegetable crops (3) – fallow (4)
Type 4 – AERs 1 and 3	Vegetable crops monoculture
Type 5 – AERs 1, 3 and 4	Vegetable crops (9) – fallow (1)

Tableau 6. Rotations simulées selon le type de ferme et la région agropédoclimatique (Sierra et al., 2017)
Les valeurs entre parenthèses indiquent le nombre d'années de chaque culture au sein de la rotation.

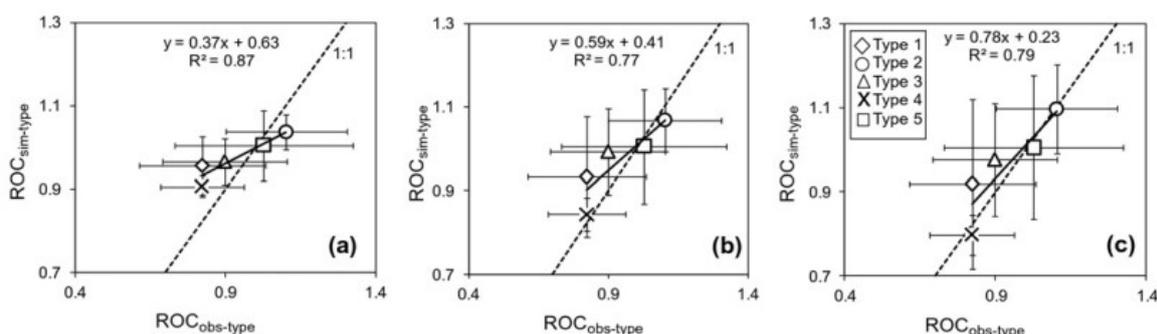


Figure 21. Relation entre les ratios $ROC_{obs-type}$ (ratio entre le stock de COS mesuré au moment de l'enquête et le stock de COS simulé à l'équilibre) et $ROC_{sim-type}$ (ratio entre le stock de COS simulé et le stock de COS simulé à l'équilibre) selon le type de ferme et sur des périodes de 10 (a), 20 (b), et 30 ans (c) après conversion depuis des systèmes pérennes (Sierra et al., 2017)

Les barres horizontales et verticales correspondent aux erreurs standard.

5.3 Pratiques de gestion dans les prairies

L'effet des pratiques de gestion dans les prairies de Guadeloupe sur les stocks de COS a été relativement peu étudié, cet usage étant peu représenté dans la BDD TropEmis-CaribAgro. Les prairies représentent pourtant des surfaces importantes dans l'archipel : environ 25000 ha en 2018, soit la moitié de la SAU (Agreste, 2019). Ces prairies (qualifiées en Guadeloupe de « savanes ») sont généralement gérées de façon extensive, pâturées et sans apport d'intrants.

Une étude a cependant été menée sur le site expérimental du Godet, portant sur la mise en place de pratiques agroforestières dans une prairie naturelle de *Dichanthium aristatum* (Dulormne et al., 2003). Le site d'étude est situé dans le nord de Grande-Terre, sur des Vertisols. Des lignes d'arbres (*Gliricidia sepium*) ont été plantées dans ces prairies, avec une gestion sans pâturage mais export de l'herbe fauchée et des résidus de taille des arbres. Cette étude s'est focalisée sur l'effet de l'implantation d'arbres fixateurs d'azote sur le cycle de l'azote, mais les teneurs en stocks de COS ont également été mesurés au cours de l'étude. Les mesures de stocks de COS ont été effectuées en 1989, avant l'implantation des arbres, et en 2000, sur une profondeur de 20 cm, dans les parcelles agroforestières et dans les parcelles témoin, sans arbres. Dans les deux modalités les stocks de COS ont augmenté (Figure 22), mais avec un taux plus élevé dans le cas des parcelles agroforestières : $1.9 \text{ Mg COS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, contre $1.7 \text{ Mg COS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ dans les parcelles témoin. En moyenne, la pratique de l'agroforesterie a donc provoqué un stockage additionnel de $0.2 \text{ Mg COS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ sur ces parcelles. La variabilité spatiale des teneurs en COS mesurées dans les deux systèmes montre un effet 'site', et également un effet 'distance à l'arbre', puisque les teneurs en COS mesurées dans les parcelles témoins étaient généralement plus élevées pour les points proches des parcelles agroforestières (Figure 22).

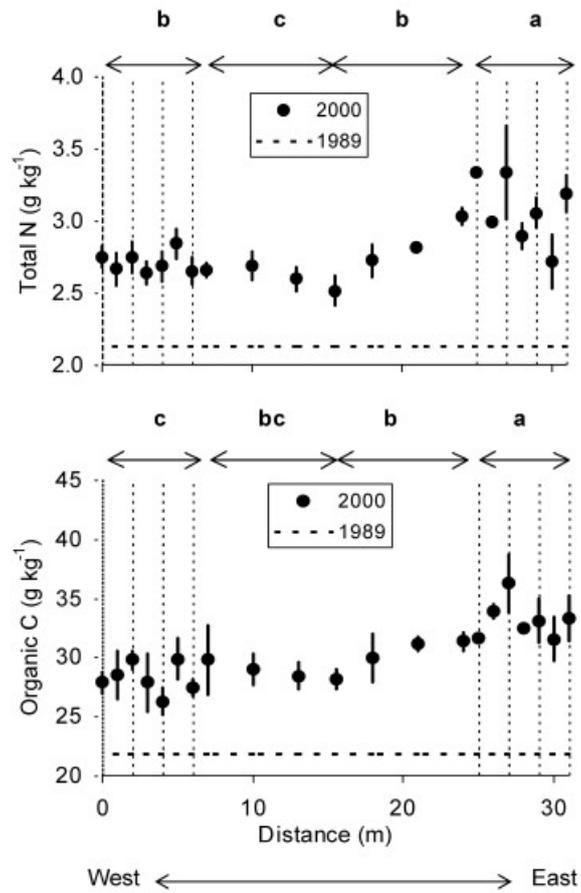


Figure 22. Teneurs en N et C organique des sols dans des prairies et des prairies agroforestières, dans la couche 0-20 cm, en 1989 (avant le début de l'étude) et en 2000 (Dulorme et al., 2003)

Les flèches indiquent les limites des sous-parcelles délimitées dans l'étude. Les lignes pointillées verticales indiquent l'emplacement des lignes d'arbres. Les lettres correspondent aux groupes statistiques significativement différents au seuil $p < 0.05$. Les barres verticales des points correspondent à l'erreur standard ($n=3$).

6 Synthèse et perspectives

A l'échelle de l'archipel guadeloupéen, les stocks de COS sont principalement contrôlés par le type de sol, tandis que l'usage du sol ne permet pas de distinguer les stocks de COS.

Les données observées et simulées à l'aide du modèle MorGwanik mettent néanmoins en évidence l'effet de l'usage du sol sur la trajectoire des stocks de COS à l'échelle de la parcelle et de la région agropédoclimatique, avec des stocks faiblement décroissants à croissants pour les cultures pérennes de banane et canne, et significativement décroissants pour les cultures annuelles de 'diversification' (maraîchage, ananas, tubercules, melon).

Dans la lignée de ces résultats, les changements d'usage des systèmes pérennes vers les systèmes de diversification entraînent une diminution des stocks de COS, aggravée par l'effet du changement climatique. Cependant les simulations conduites avec le modèle MorGwanik montrent que l'adoption de pratiques de gestion influençant les apports de C arrivant au sol (la fertilisation organique) et la minéralisation du COS (la réduction du travail du sol) permet d'atténuer les effets des changements d'usage et du changement climatique. Dans les exploitations avec des cultures maraîchères, l'allongement de la durée des jachères est une pratique qui permettrait également d'augmenter les stocks de COS. Dans le nord de Basse-Terre, où les sols sont acides, le chaulage des sols pourrait contribuer à l'augmentation des rendements de canne à sucre et ainsi limiter la diminution des stocks de COS.

A l'échelle du territoire agricole, Chopin et Sierra (2021) ont calculé la part du territoire concerné par une augmentation tendancielle des stocks de COS d'au moins 4‰ an⁻¹. Cette part est actuellement de 26%, et dans le meilleur scénario d'adoption des pratiques de gestion favorables au stockage de COS, cette part n'atteindrait que 31% du territoire agricole (

Scenario		Land area in 4 per 1000		Annual SOC change at the territory level		
Tillage	Land use	Amended area	%	kg C ha ⁻¹ year ⁻¹	Mg C year ⁻¹	‰ year ^{-1a}
Conventional	Current	Current	26 ^b	-96	-2043 ^b	-1.5 ^b
		+50%	28	-69	-1467	-1.1
	+50% of annual crops	Current	20	-208	-4426	-3.2
		+50%	22	-171	-3635	-2.7
Reduced	Current	Current	29	-39	-824	-0.6
		50%	31	-9	-191	-0.1
	+50% of annual crops	Current	28	-62	-1325	-1.0
		+50%	31	-17	-367	-0.3

^a‰ of the initial soil organic carbon (SOC stock)

^bReference scenario

Tableau). En moyenne, dans l'ensemble des scénarios testés, la variation des stocks de COS est négative. Ces résultats illustrent les contraintes du stockage additionnel de COS dans le contexte caribéen. Il est notamment d'autant plus difficile d'augmenter les stocks de COS lorsque ceux-ci sont déjà élevés, comme cela a été montré à une échelle globale (Minasny et al., 2017).

Scenario			Land area in 4 per 1000	Annual SOC change at the territory level		
Tillage	Land use	Amended area	%	kg C ha ⁻¹ year ⁻¹	Mg C year ⁻¹	% year ^{-1a}
Conventional	Current	Current	26 ^b	-96	-2043 ^b	-1.5 ^b
		+50%	28	-69	-1467	-1.1
	+50% of annual crops	Current	20	-208	-4426	-3.2
		+50%	22	-171	-3635	-2.7
Reduced	Current	Current	29	-39	-824	-0.6
		50%	31	-9	-191	-0.1
	+50% of annual crops	Current	28	-62	-1325	-1.0
		+50%	31	-17	-367	-0.3

^a % of the initial soil organic carbon (SOC stock)

^b Reference scenario

Tableau 7. Part du territoire guadeloupéen où la cible '4 pour 1000' est atteinte selon différents scénarios d'usage et de gestion des sols, et variations annuelles de stocks de COS à l'échelle de la Guadeloupe pour ces scénarios (Chopin and Sierra, 2021)

'+50% annual crops' correspond à une augmentation de 50% des surfaces consacrées aux cultures de diversification. '+50%' pour la colonne 'Amended area' correspond à une augmentation de 50% des surfaces amendées par fertilisation organique.

Il existe actuellement peu de données sur la dynamique des stocks de COS dans les prairies de Guadeloupe, malgré leurs surfaces importantes. Ces systèmes extensifs et âgés (>100 ans) sont actuellement considérés comme étant à l'équilibre, mais les stocks de COS pourraient évoluer sous l'effet du changement climatique.

Les pratiques de gestion étudiées en Guadeloupe dans les systèmes de diversification concernent actuellement le travail du sol, les amendements organiques, et la durée des jachères. D'autres pratiques de gestion réputées stocker du COS mériteraient d'être étudiées, telles que les pratiques agroforestières, l'insertion de prairies temporaires, et les associations culturales. Ces pratiques pourraient être promues dans le cadre d'un soutien à la « Petite Agriculture Familiale » dans les Outremer (Ozier-Lafontaine et al., 2018). Une des limites actuelles à l'analyse de ces pratiques est l'impossibilité de modéliser leurs effets avec le modèle MorGwanik, ces pratiques n'étant pas présentes dans la BDD ayant servi à calibrer le modèle.

7 Bibliographie

- Agreste, 2021. L'occupation du sol entre 1982 et 2018.
- Agreste Guadeloupe, 2019. Mémento de la statistique agricole.
- 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.
- Andriulo, A., Mary B., Guerif, J., 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping. *Agronomie* 19, 365–377.
- Barré, P., Fernandez-Ugalde, O., Virto, I., Velde, B., Chenu, C., 2014. Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: incomplete knowledge and exciting prospects. *Geoderma* 235–236, 382–395. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.029>
- 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>
- 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.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussièrre, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model stics. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7)
- Cabidoche, Y.-M., 2000. Cours de genèse des sols de la Caraïbe à l'Université des Antilles. Diaporama.
- 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., 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>

- Chopin, P., Sierra, J., 2021. Potential and constraints for applying the “4 per 1000 Initiative” in the Caribbean: the case of Guadeloupe. *Reg. Environ. Change* 21, 13. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01740-4>
- Chopin, P., Sierra, J., 2019. Reduced tillage and organic amendments can offset the negative impact of climate change on soil carbon: A regional modelling study in the Caribbean. *Soil Tillage Res.* 192, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.009>
- Clermont-Dauphin, C., Cabidoche, Y.-M., Meynard, J.-M., 2004. Effects of intensive monocropping of bananas on properties of volcanic soils in the uplands of the French West Indies. *Soil Use Manag.* 20, 105–113. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00345.x>
- Colmet-Daage, F., 1980. La Guadeloupe - Planche 10, in : Atlas des Départements Français d’Outre-Mer. ORSTOM, p. 2.
- Colmet-Daage, F., Bernard, J., Gautheyrou, J., Gautheyrou, M., Lagache, F., Grécy, J. de, Poumaroux, A., Pallud, A., 1969. Cartes des sols de la Guadeloupe [cartes des sols des Antilles : feuilles nos 25 à 41]. BSA, Pointe à Pitre.
- Cruz, P., Guillaume, P., 1999. Croissance et nutrition minérale de la canne à sucre au cours de repousses successives - Agritrop. *Cah. Agric.* 8, 101–107.
- DAAF Guadeloupe, 2016. Carte sur la Délimitation et la Caractérisation des espaces agricoles en 2010 et 2013 (DCEA) [WWW Document]. URL <https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/Cartes-sur-la-Delimitation-et-la> (accessed 10.21.21).
- 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. *Agrofor. Syst.* 59, 121–129. <https://doi.org/10.1023/A:1026387711571>
- Dupuits, E., Jameux, M., Brossard, M., 2015. Synthèses des morphopédologiques de la Guadeloupe, de Guyane française et de l’île de la Réunion, Rapport Final de Convention MAAF – DGPAAT.
- Ellert, B.H., Bettany, J.R., 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.* 75, 529–538.
- 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>
- IPGP, 2021. Le volcanisme de la Basse-Terre [WWW Document]. URL <https://www.ipgp.fr/fr/ovsg/volcanisme-de-basse-terre> (accessed 10.21.21).
- Karucover 2010-2017, n.d. URL https://deal971.lizmap.com/carto/index.php/view/map/?repository=karucover&project=Livraison_Final_OCSGE2D971 (accessed 10.21.21).
- Komorowski, J.-C., Boudon, G., Semet, M.P., Beauducel, F., Anténor-Habazac, C., Bazin, S., Hammouya, G., 2005. Guadeloupe, in: *Volcanic Atlas of the Lesser Antilles*. University of the West Indies, Seismic Research Unit, pp. 65–102.
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O’Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B., Winowiecki, L., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- 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)
- Raphael, L., Sierra, J., Recous, S., Ozier-Lafontaine, H., Desfontaines, L., 2012. Soil turnover of crop residues from the banana (*Musa* AAA cv. Petite-Naine) mother plant and simultaneous uptake by the daughter plant of released nitrogen. *Eur. J. Agron.* 38, 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.07.005>

- Ripoche, A., Jacqua, G., Bussière, F., Guyader, S., Sierra, J., 2008. Survival of *Colletotrichum gloeosporioides* (causal agent of yam anthracnose) on yam residues decomposing in soil. *Appl. Soil Ecol.* 38, 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.10.015>
- Rochette, R., David, D., Sierra, J., 2019. BDD TropEmis & CaribAgro
- Sierra, J., 2014. Evaluation agronomique, environnementale et économique des Mesures Agro-Environnementales (MAE) concernant l'utilisation de composts en Guadeloupe. Cas d'une culture vivri re 9 p. + annexes.
- Sierra, J., Causeret, F., 2018. Changes in soil carbon inputs and outputs along a tropical altitudinal gradient of volcanic soils under intensive agriculture. *Geoderma* 320, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.025>
- Sierra, J., Causeret, F., Chopin, P., 2017. A framework coupling farm typology and biophysical modelling to assess the impact of vegetable crop-based systems on soil carbon stocks. Application in the Caribbean. *Agric. Syst.* 153, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.004>
- Sierra, J., Causeret, F., Diman, J.L., Publicol, M., Desfontaines, L., Cavalier, A., Chopin, P., 2015a. Observed and predicted changes in soil carbon stocks under export and diversified agriculture in the Caribbean. The case study of Guadeloupe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 213, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.08.015>
- Sierra, J., Chopart, J.L., Guind , L., Blazy, J.M., 2016. Optimization of Biomass and Compost Management to Sustain Soil Organic Matter in Energy Cane Cropping Systems in a Tropical Polluted Soil: a Modelling Study. *BioEnergy Res.* 9, 798–808. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9729-z>
- Sierra, J., David, D., Causeret, F., Publicol, M., Desfontaines, L., Chopin, P., 2015b.  valuation régionalisée de l'émission et de la séquestration du carbone dans les sols tropicaux de Guadeloupe (TROP MIS). INRA - Carib Agro.
- Sierra, J., Desfontaines, L., 2018a. Les sols de Guadeloupe. Gen se, distribution & propriétés. INRA Antilles-Guyane, Guadeloupe.
- Sierra, J., Desfontaines, L., 2018b. Predicting the in situ rate constant of soil carbon mineralisation from laboratory-based measurements in tropical soils under contrasting tillage management systems. *Soil Tillage Res.* 180, 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.008>
- Svanes, E., Aronsson, A.K.S., 2013. Carbon footprint of a Cavendish banana supply chain. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1450–1464. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0602-4>
- Vaughan, E., Matos, M., R os, 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>
- Wang, Y., Yao, Z., Zhan, Y., Zheng, X., Zhou, M., Yan, G., Wang, L., Werner, C., Butterbach-Bahl, K., 2021. Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. *Glob. Change Biol.* 27, 2807–2821. <https://doi.org/10.1111/gcb.15607>
- Wattel- Koekkoek, E.J.W., Buurman, P., Van Der Plicht, J., Wattel, E., Van Breemen, N., 2003. Mean residence time of soil organic matter associated with kaolinite and smectite. *Eur. J. Soil Sci.* 54, 269–278. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00512.x>
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J.C., Sampson, C.C., Kanae, S., Bates, P.D., 2017. A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.* 44, 5844–5853. <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>

8 Annexe

Type de sol original (BDD TropEmis-CaribAgro)	Type de sol simplifié	n
Alluvions continentales et colluvions	Sols alluvionnaires	28
Andosols < 350m	Andosols < 350m	58
Andosols > 350m	Andosols > 350m	77
Ferralsols compacts BT	Ferralsols	13
Ferralsols compacts GT	Ferralsols	18
Ferralsols faiblement désaturés	Ferralsols	121
Ferralsols moyennement à fortement désaturés	Ferralsols	97
Nitisols évolués	Nitisols	104
Nitisols peu évolués	Nitisols	49
Sols bruns andiques type Capesterre < 150m	Sols bruns andiques	73
Sols bruns andiques type Capesterre > 150m	Sols bruns andiques	45
Sols bruns andiques type Matouba	Sols bruns andiques	31
Sols calcimorphes, sols squelettiques et affleurements calcaires	Sols calcimorphes	144
Vertisols calci-magnésiques non hydromorphes	Vertisols	4
Vertisols calciques hydromorphes	Vertisols	42
Vertisols calciques non hydromorphes	Vertisols	100

Annexe. Correspondance entre les noms de sols renseignés dans la BDD TropEmis-CaribAgro (Rochette et al., 2019) et les noms de sols simplifiés utilisés dans la synthèse 4P1000 Outre-mer

n désigne le nombre d'échantillons.