



HAL
open science

Synthèse biophysique sur le stockage de carbone dans les sols à La Réunion

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 à La Réunion. CIRAD; INRAE; IRD. 2023. hal-04156234

HAL Id: hal-04156234

<https://hal.inrae.fr/hal-04156234v1>

Submitted on 7 Jul 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 à La Réunion*



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 à La Réunion - 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, 26 p.

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

Table des matières

1	Introduction	4
1.1	Objectifs de la synthèse	4
1.2	Principales sources de données mobilisées.....	4
2	Contexte biophysique de La Réunion.....	5
2.1	Situation géographique, topographie	5
2.2	Géologie	5
2.3	Climat	6
2.4	Occupation et usage des sols	6
2.5	Typologie des sols	7
3	Quels sont les stocks de carbone du sol et quels en sont les principaux déterminants ? 9	
3.1	Source des données et méthodologie	9
3.1.1	Base de données d'analyses de sols	9
3.1.2	Estimation de la densité apparente des sols et mise au point d'une typologie des sols par spectrométrie infrarouge	9
3.2	Analyse globale des déterminants des teneurs en COS.....	10
3.3	Stocks de COS selon le type de sol	11
3.4	Stocks de COS selon l'usage du sol	14
3.5	Spatialisation des stocks de COS	14
4	Effets des changements/maintien d'usage des sols sur les stocks de carbone du sol..	17
4.1	Evolution tendancielle des teneurs en COS	17
4.2	Effet des changements d'usage sur les variations de stocks de COS	18
5	Effets des changements/maintien des pratiques agricoles et forestières sur les stocks de carbone du sol	20
5.1	Effet des pratiques de gestion dans les cultures pérennes.....	20
5.2	Effet des apports de produits résiduaux organiques.....	20
5.2.1	Effet sur les stocks de COS	20
5.2.2	Effet sur les émissions de N ₂ O.....	23
6	Synthèse et perspectives	24
7	Bibliographie	25

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) à La Réunion. Compte tenu des données disponibles, les thématiques suivantes sont développées 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

Les travaux sur le stockage de COS dans les sols de La Réunion peuvent être différenciés par leur échelle d'étude : les déterminants des stocks de COS, leur spatialisation et l'effet des usages et changements d'usage sur les stocks de COS ont été étudiés à l'échelle régionale, au cours du projet C@RUN (Allo, 2019 ; Todoroff et al., 2019). Ces travaux se sont largement basés sur l'exploitation d'une base de données d'analyses de sols, couplée à une approche de spectrométrie infrarouge permettant de classer les sols et d'évaluer les stocks de COS à une échelle régionale.

L'effet des pratiques de gestion sur les stocks de COS a été étudié au travers de dispositifs expérimentaux à l'échelle de la parcelle, où sont testés l'effet de l'apport de produits résiduels organiques (Jamoteau, 2018 ; Jamoteau et al., 2021 ; Viaud, 2019).

Pour ces deux échelles d'étude, les données disponibles ne concernent que les sols agricoles. Les stocks de COS dans les sols couverts par la végétation naturelle et leurs changements à la suite des changements d'usage n'ont pas été étudiés à La Réunion.

2 Contexte biophysique de La Réunion

2.1 Situation géographique, topographie

La Réunion est une île de l'archipel des Mascareignes, située dans l'océan Indien, au large de Madagascar (Figure 1). La topographie de l'île est marquée par un relief important et accidenté, en raison de l'histoire volcanique de l'île. Les zones d'altitude < 200 m ne sont présentes qu'au niveau du littoral ; le centre de l'île est montagneux, avec un point culminant à 3070 m au niveau du Piton des Neiges. Des cirques sont présents dans le centre de l'île (Cilaos, Salazie, Mafate). On retrouve dans le centre-sud-est de l'île des reliefs importants, correspondant au Piton de la Fournaise. Une plaine d'altitude (Plaine des Cafres) se situe entre le massif du Piton de la Fournaise et le massif du Piton des Neiges.

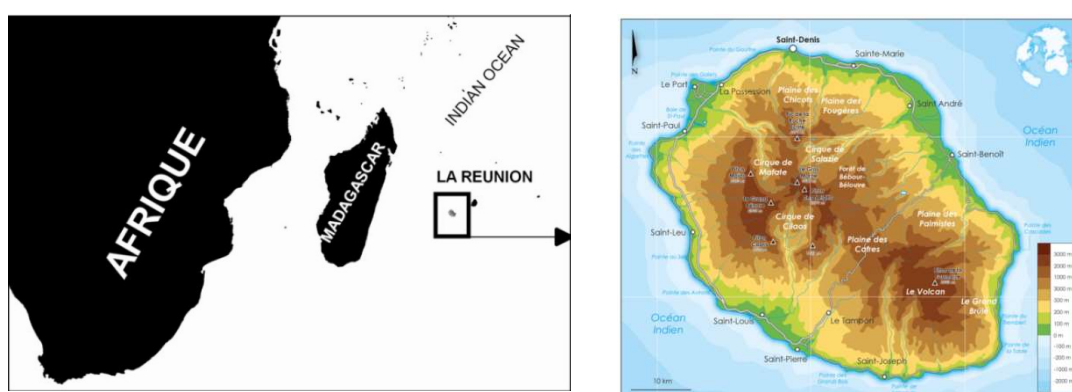


Figure 1. Localisation et carte topographique de la Réunion (encart de droite : Allo, 2019 ; encart de gauche : Bart, 2016)

2.2 Géologie

La Réunion est une île volcanique, constituée de deux grands massifs (Figure 2). Le massif du Piton des Neiges est le plus ancien, sa mise en place a débuté il y a environ 2,5 millions d'années, au cours d'une phase basaltique (phase I mentionnée sur la légende de la Figure 2) jusqu'à - 430 000 ans. Les roches affleurantes les plus anciennes sont âgées de 2,3 millions d'années. La phase récente du volcan (entre - 340 000 et - 9000 ans) a vu la mise en place d'un strato-volcan, avec une activité de plus en plus explosive au cours du temps. La formation des cirques est due à l'effondrement des chambres magmatiques et à l'érosion. Le massif du Piton de la Fournaise est un ensemble plus récent (- 500 000 ans), actif au niveau du Piton de La Fournaise, avec une activité principalement effusive.

Les différents types d'activités volcaniques des volcans réunionnais entraînent une large variété de types de roches affleurantes : des produits intrusifs (dykes) peuvent être retrouvés dans les cirques du Piton des Neiges ; l'activité explosive du Piton des Neiges a produit des matériaux pyroclastiques (cendres, ponces) ; l'activité effusive a pu produire des coulées de laves en cordes ou en gratons.

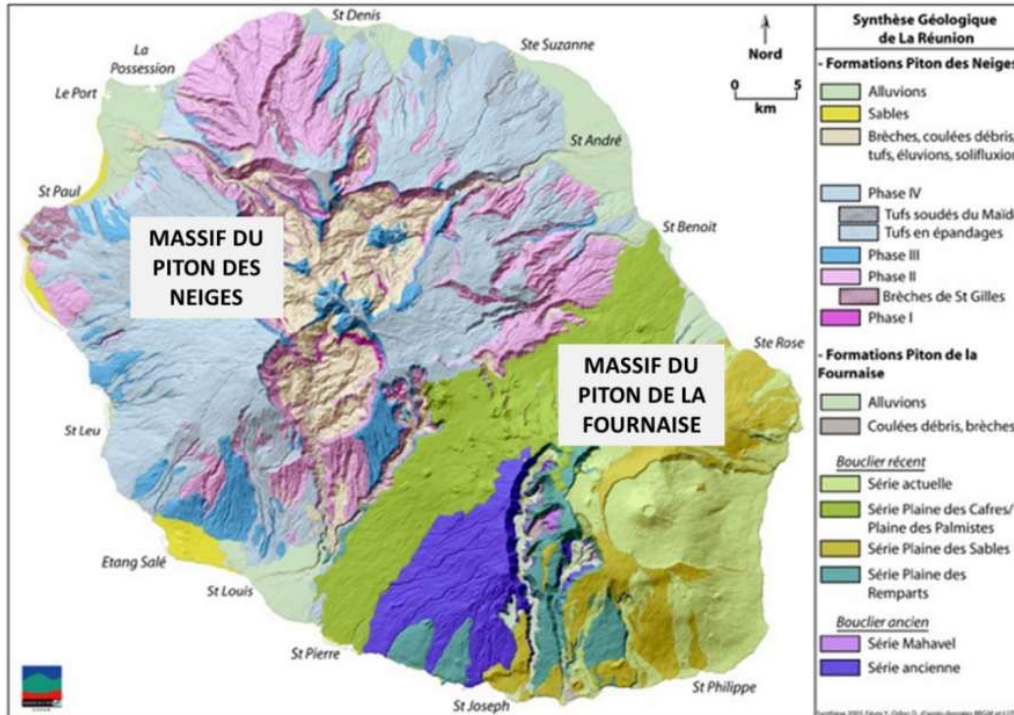


Figure 2. Carte géologique de La Réunion (BRGM, 2006, adaptée par Allo, 2019)

2.3 Climat

Le climat de La Réunion est tropical, mais est fortement influencé par la topographie et le sens des vents dominants. Le fort gradient altitudinal (de 0 à 3000 m) induit une variabilité importante de la température moyenne à l'échelle de l'île (Figure 3). Le climat est donc considéré comme tempéré montagnard dans les hauteurs du centre de l'île. En outre, la variabilité spatiale des précipitations annuelles est très importante, sous l'influence des vents dominants. Ces alizés proviennent de l'est, ce qui, conjugué au relief de l'île, entraîne des précipitations importantes dans l'est de l'île pouvant dépasser les 6000 mm par an (côte au vent), tandis que les précipitations sont inférieures à 1000 mm par an sur le littoral ouest (côte sous le vent).

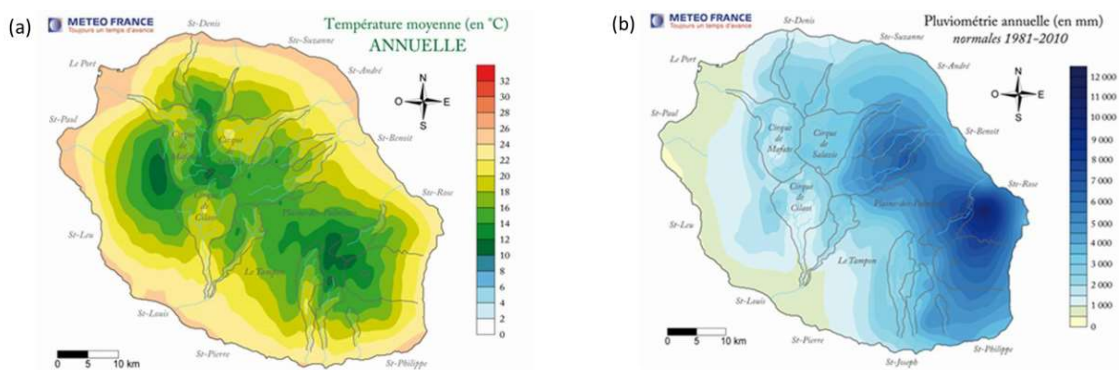


Figure 3. Cartes de la température moyenne annuelle à La Réunion (a) et de la pluviométrie annuelle (b) (source des données : Météo-France, in Allo, 2019)

2.4 Occupation et usage des sols

Plus de la moitié de la superficie de La Réunion est occupée par les forêts (Agreste, 2021), que l'on retrouve principalement dans les zones montagneuses (les 'Hauts') de l'île (Figure 4). En raison de

l'activité volcanique récente, une part importante de la superficie est couverte de roches nues ou colonisées par de la végétation naturelle.

Les usages agricoles représentent 18 % de la surface de l'île en 2018 (Agreste, 2021) et sont concentrés sur la bande littorale et au niveau de la plaine d'altitude située entre les deux volcans (la Plaine des Cafres). La canne à sucre est la culture dominante à La Réunion ; elle occupait, en 2018, 22 855 ha sur les 28 825 ha de terres arables (Agreste La Réunion, 2019), principalement sur les façades nord-est et sud du littoral. Les cultures fruitières et maraîchères couvrent respectivement 2 876 et 2 056 ha en 2018. Les prairies permanentes occupent environ 10 000 ha, elles sont présentes au niveau de la Plaine des Cafres et sur les contreforts ouest du massif du Piton des Neiges.

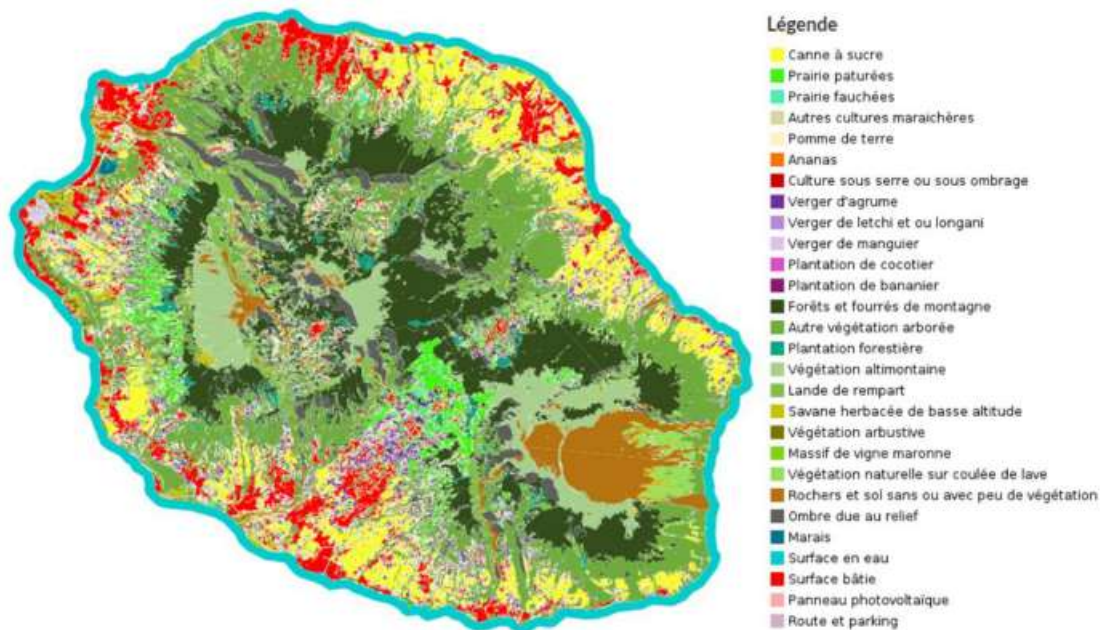


Figure 4. Carte d'occupation des sols à La Réunion (Dupuy, 2018)

2.5 Typologie des sols

La variabilité spatiale de la distribution des sols est importante à La Réunion, en raison de la variété des roches volcaniques affleurantes, de leur âge, et des gradients de température et de précipitations qui résultent du relief de l'île.

Plusieurs cartes pédologiques ont été produites à La Réunion, dont les correspondances entre les types de sols sont synthétisées par Feder et Bourgeon (2009). Pouzet (2002) a réalisé une carte morphopédologique simplifiée, à partir des travaux de Raunet (1988) : huit types de sols ont été distingués dans cette carte morphopédologique (Figure 5) :

- Les sols andiques et andiques perhydratés (Andosols dans la classification World Reference Base - WRB) sont des sols formés sur des dépôts volcaniques récents, dans des régions fraîches d'altitude et/ou très arrosées. Ces conditions empêchent la formation d'argiles secondaires mais favorisent la formation de silicates d'alumine mal cristallisés, les imogolites ou allophanes. Ces minéraux secondaires présentent une surface d'échange importante, entraînant une capacité d'échange cationique et anionique de ces sols très élevée. Les sols andiques perhydratés présentent en outre une capacité de rétention en eau très importante. Les sols andiques sont situés dans les Hauts de l'île et sur les flancs est du volcan du Piton de la Fournaise, caractérisés par des dépôts volcaniques d'âge contemporain.
- Les sols bruns (Cambisols dans la classification WRB) sont caractérisés par la présence d'argiles de type 1/1, l'hallyosite, et d'oxyhydroxydes de fer. Ces sols se sont formés sur des dépôts volcaniques anciens, dans des conditions bien plus sèches que les sols andiques. Les sols bruns

andiques correspondent à un stade de développement intermédiaire entre les sols bruns et andiques. Les sols bruns sont localisés sur les façades ouest et sud-ouest de l'île, caractérisés par un climat tropical relativement sec.

- Les sols ferrallitiques (Ferralsols dans la classification WRB) sont caractérisés par un stade de développement plus avancé que les sols bruns, car situés sur des dépôts encore plus anciens et soumis à une altération plus importante due aux précipitations abondantes. Ils sont riches en argiles de type 1/1 et en oxyhydroxydes de fer et d'aluminium. Comme pour les sols bruns, les sols ferrallitiques peuvent parfois présenter des propriétés andiques lorsqu'ils sont présents en altitude. Ces sols sont situés majoritairement sur les plateaux du nord de l'île.
- Les sols vertiques (Vertisols) sont ponctuellement présents dans l'ouest de l'île. Les faibles précipitations entraînent la formation d'argiles gonflantes de type 2/1. Ces sols présentent une importante capacité d'échange cationique.
- Les sols sur alluvions sont des sols jeunes qui se sont développés sur les importants cônes de déjection des rivières se jetant dans l'océan. Ces sols présentent souvent une texture grossière et sont peu différenciés.

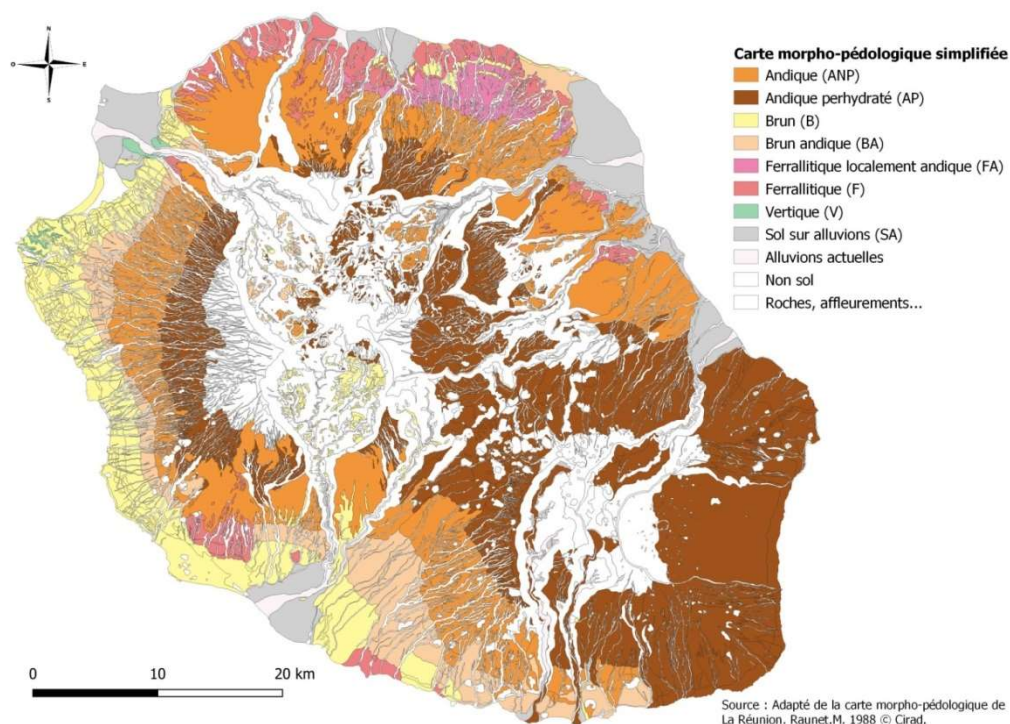


Figure 5. Carte morphopédologique simplifiée de La Réunion (Pouzet, 2002, adapté de Raunet, 1988)

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

3.1 Source des données et méthodologie

3.1.1 Base de données d'analyses de sols

L'évaluation des stocks de COS à l'échelle de La Réunion était l'un des objectifs du projet C@RUN (Allo, 2019 ; Todoroff et al., 2019). Cette évaluation s'est appuyée sur l'analyse d'une base de données (BDD) d'analyses de sols agricoles de La Réunion appartenant au Cirad (Collinet et al., 2021), contenant environ 45 000 analyses chimiques réalisées entre 1993 et 2017 (Todoroff et al., 2019).

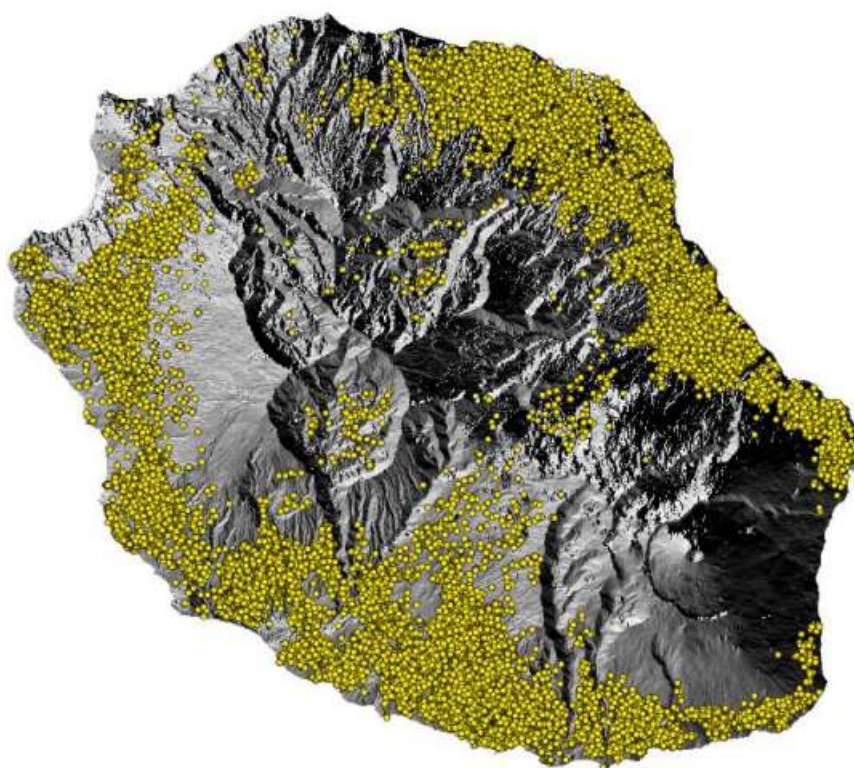


Figure 6. Localisation des prélèvements effectués en vue des analyses de sols présentes dans la base de données d'analyses de sols de La Réunion (Todoroff et al., 2019)

3.1.2 Estimation de la densité apparente des sols et mise au point d'une typologie des sols par spectrométrie infrarouge

Le calcul du stock de COS d'un sol nécessite la connaissance des variables suivantes : la teneur en COS de l'échantillon de sol pour une couche de sol donnée, l'épaisseur de cette couche de sol, la densité apparente du sol, et la teneur massique en éléments grossiers > 2 mm. Or la BDD utilisée dans le projet C@RUN contient uniquement les teneurs en COS des échantillons de sols analysés, prélevés dans l'horizon superficiel, dont l'épaisseur a été considérée de 30 cm. Les teneurs massiques en éléments grossiers > 2 mm ont été estimées comme nulles, ce qui constitue une hypothèse peu risquée pour la plupart des sols de La Réunion, dominés par les fractions fines granulométriques ; en revanche

certaines sols peu évolués (ou développés sur des laves) peuvent contenir des quantités non négligeables d'éléments grossiers : les stocks de COS dans ces sols seraient donc surestimés.

L'estimation de la densité apparente des échantillons de sols analysés dans la BDD constitue donc une importante étape, permettant par la suite de calculer les stocks de COS puis de les spatialiser à l'échelle des espaces agricoles à La Réunion. Cette estimation de la densité apparente a été réalisée de manière concomitante à une classification spectrale des sols des échantillons de la BDD, et s'est déroulée selon les étapes suivantes (Allo, 2019) :

- Des analyses spectrales proche et moyen infrarouge ont été réalisées sur des sols échantillonnés par carottage dans des contextes pédoclimatiques contrastés à La Réunion (n=95 carottes). Sur ces échantillons, des analyses conventionnelles ont également été conduites : densité apparente, teneur en COS, et teneurs en produits amorphes : Al, Fe, et Si extraits à l'oxalate (Al_o , Fe_o , Si_o), et Al et Fe extraits au pyrophosphate (Al_p , Fe_p). Ces analyses ont conduit à la calibration et validation de modèles de prédiction des teneurs en COS, densité apparente, stocks de COS, et teneurs en produits amorphes, à partir des analyses spectrales (Allo et al., 2020). A La Réunion, des travaux antérieurs ont également montré que la spectrométrie proche infrarouge permettait de prédire les teneurs en COS (Thuriès et al., 2013).
- Des analyses spectrales moyen-infrarouge ont été réalisées sur une population de 962 échantillons issus de la BDD, provenant en grande majorité de parcelles cultivées en canne à sucre. Grâce aux modèles établis par Allo et al. (2020), la densité apparente a pu être prédite sur ces 962 échantillons de sols, ainsi que les teneurs en COS et teneurs en produits amorphes (Allo, 2019).
- Une typologie spectrale des sols a été créée à partir de la population des 962 échantillons de sols caractérisés spectralement (Allo, 2019). Cette classification s'est faite par partitionnement (k-medoids) en séparant dans une première étape les sols andiques des sols non andiques, qui se matérialisent par une dichotomie au niveau des teneurs en oxalfe ($Al_o + 1/2 Fe_o$). Les sols andiques ont ensuite été divisés en 5 groupes, et les sols non andiques en 4 groupes, formant ainsi 9 groupes de sols homogènes spectralement.
- Pour les 9 groupes de sols identifiés dans la population des 962 échantillons, les moyennes de densité apparente et des produits amorphes ont été calculées.
- L'ensemble de la BDD a été nettoyée et filtrée (suppression des doublons, des échantillons avec coordonnées manquantes ou aberrantes, analyses de sols en profondeur) pour conserver 8742 échantillons de sols, qui incluent la population des 962 échantillons analysés spectralement.
- Le type de sol spectral des 7780 échantillons sans analyse spectrale a été prédit par un algorithme Random Forest construit à partir des 962 échantillons classés, et incluant des variables qualitatives (âge et type de matériaux parentaux géologiques) et quantitatives (nombre de mois pluvieux, C, N, pH, pH_{KCl} , capacité d'échange cationique - CEC, somme des bases, altitude, pente, pluie médiane annuelle, température moyenne annuelle) renseignées pour la population des 7780 échantillons.
- La densité apparente de la population des 7780 échantillons a été attribuée selon la densité apparente moyenne du type de sol spectral correspondant, permettant ainsi le calcul des stocks de COS pour ces 7780 échantillons.

3.2 Analyse globale des déterminants des teneurs en COS

Les déterminants des teneurs en COS des échantillons de sols de la BDD d'analyses des sols du Cirad ont été évalués par Allo (2019) par la méthode des arbres de régression boostés. Les covariables utilisées sont celles présentes dans la BDD, à savoir des covariables chimiques mesurées sur ces échantillons (CEC, pH, pH_{KCl} , cations) et des covariables liées à l'environnement de la parcelle et aux pratiques agricoles. La représentation de l'importance relative de ces déterminants montre que la

typologie des sols est le déterminant majeur des variations de COS observées. La faible importance relative des variables climatiques, de l'altitude, et des propriétés chimiques des sols, pourrait s'expliquer par le fait que ces variables contribuent déjà à la variabilité des types de sols rencontrés à La Réunion. La combinaison de ces variables influence l'intensité de l'altération et la formations de minéraux secondaires, qui sont prises en compte pour qualifier et différencier les types de sols.

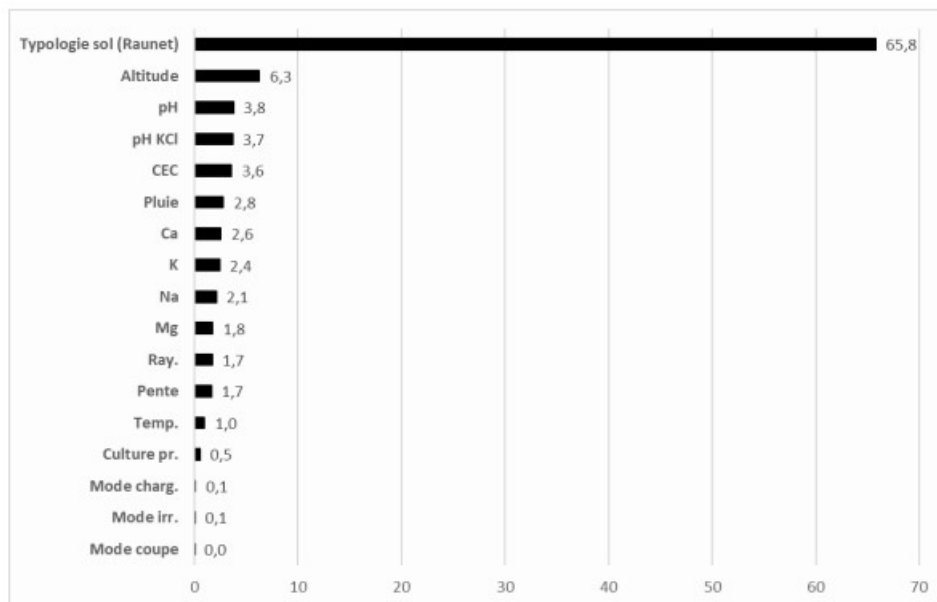


Figure 7. Importance relative des déterminants des teneurs en COS du modèle BRT (arbres de régression boostés), sur 7949 échantillons de sols de la BDD d'analyses de sols du Cirad (Allo, 2019)

Pluie : précipitation moyenne annuelle ; Temp. : température moyenne annuelle ; Ray. : rayonnement moyen annuel ; Mode irr. : mode d'irrigation de la canne à sucre ; Mode coupe : mode de coupe de la canne à sucre ; Mode charg. : mode de chargement de la canne à sucre ; Culture pr. : culture précédente.

3.3 Stocks de COS selon le type de sol

Le type de sol est un déterminant majeur de la variabilité des teneurs et des stocks de COS à La Réunion (voir section 3.2).

La comparaison des teneurs en COS selon les types de sol a été réalisée par Allo (2019) en comparant deux systèmes de classification des sols : celui de la carte morphopédologique simplifiée de Pouzet (2002) et celui établi lors de la thèse de Allo (2019) à partir des analyses spectrales. La correspondance entre les unités pédologiques spectrales, les abréviations utilisées dans certaines figures de ce document et la minéralogie dominante de ces types de sols est présentée en Table 1. Correspondance entre unités pédologiques spectrales, abréviations utilisées et minéralogie dominante dans ces sols (Allo, 2019) Allo (2019) montre que le coefficient de variation des teneurs en COS est réduit lorsque la teneur en COS est analysée selon le type de sol spectral, justifiant la pertinence de cette classification pour discriminer les teneurs et stocks de COS selon le type de sol (Figure 8). Le coefficient de variation très élevé pour l'unité n°2 (code P) peut s'expliquer par le fait que ces sols sont peu évolués et développés sur des apports de matériaux érodés, dont la composition minéralogique peut être très variable.

N° d'unité pédologique spectrale	Abréviation	Minéralogie dominante
1	Ga	Gibbsite et allophanes
2	P	Sols peu évolués d'apport par l'érosion
3	Aa	Allophanes
4	Ah	Allophanes et halloysite
5	Ag	Allophanes et gibbsite
6	Gh	Gibbsite et halloysite
7	H	Halloysite
8	Hh	Halloysite et halloysite hydratée
9	Hi	Halloysite et interstratifiés

Table 1. Correspondance entre unités pédologiques spectrales, abréviations utilisées et minéralogie dominante dans ces sols (Allo, 2019)

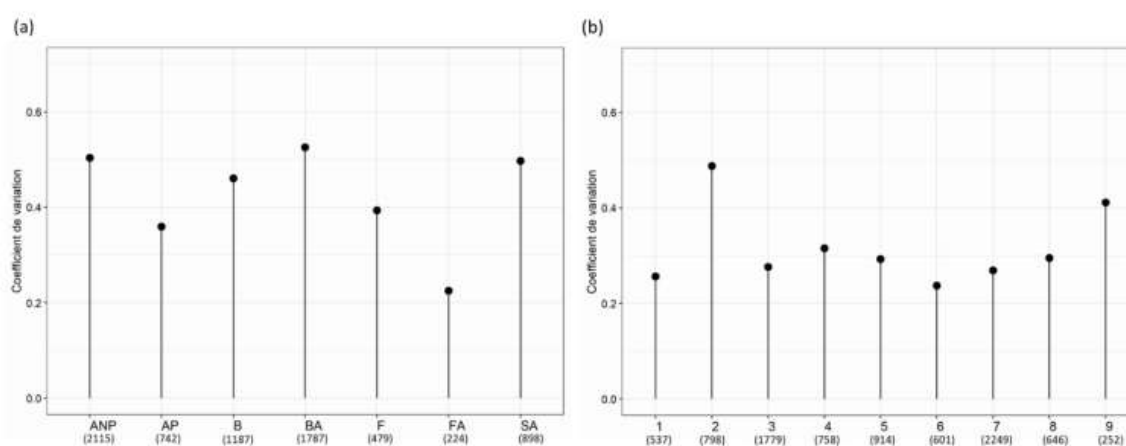
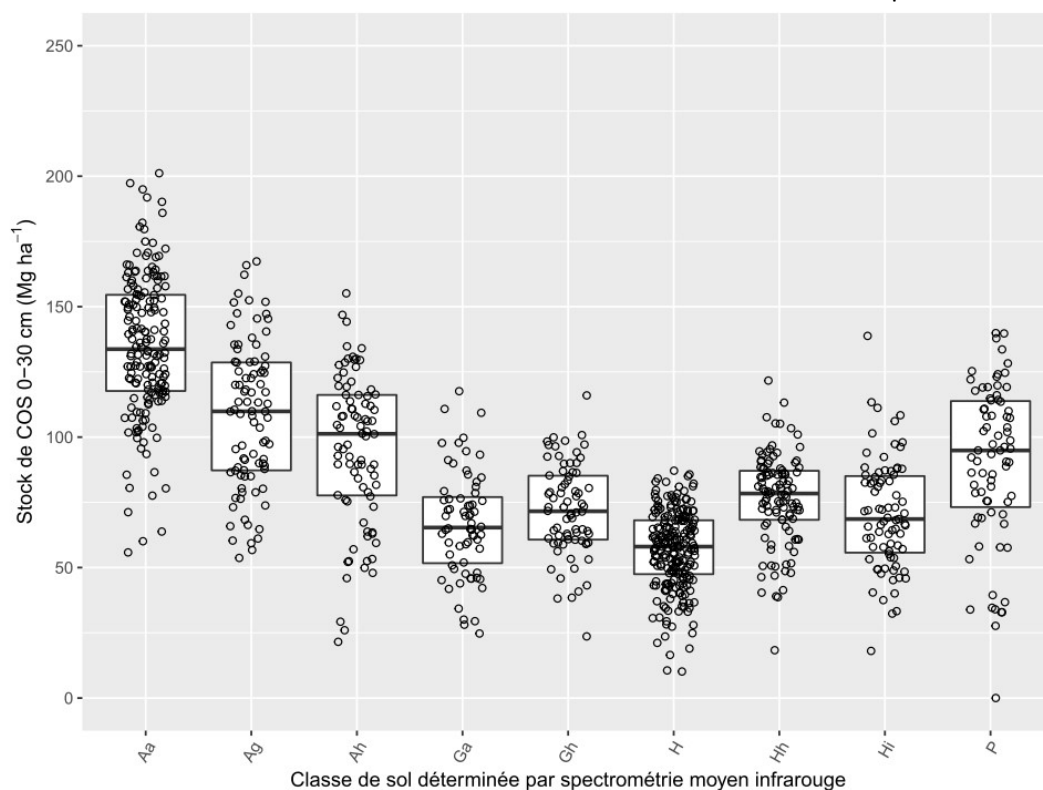


Figure 8. Coefficients de variation des teneurs en COS par type de sol (Allo, 2019) selon les types de sol de la carte morphopédologique de Pouzet (2002) (a) et selon les unités pédologiques spectrales définies par Allo (2019) (b). Les effectifs sont indiqués entre parenthèses (Allo, 2019)

Les stocks de COS représentés selon le type de sol spectral pour 962 échantillons représentatifs de l'île et issus de sols cultivés en canne à sucre montrent les tendances suivantes : les sols riches en allophanes, aux propriétés andiques (abréviations Aa, Ah, Ag) présentent les stocks de COS les plus importants, tandis que les sols dominés par la gibbsite et l'halloysite (Ga, Gh, H, Hh Hi) présentent les

stocks de COS les plus faibles



(Figure 9). Les stocks de COS élevés dans les sols andiques sont expliqués par la présence d’allophanes, qui contribuent 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)

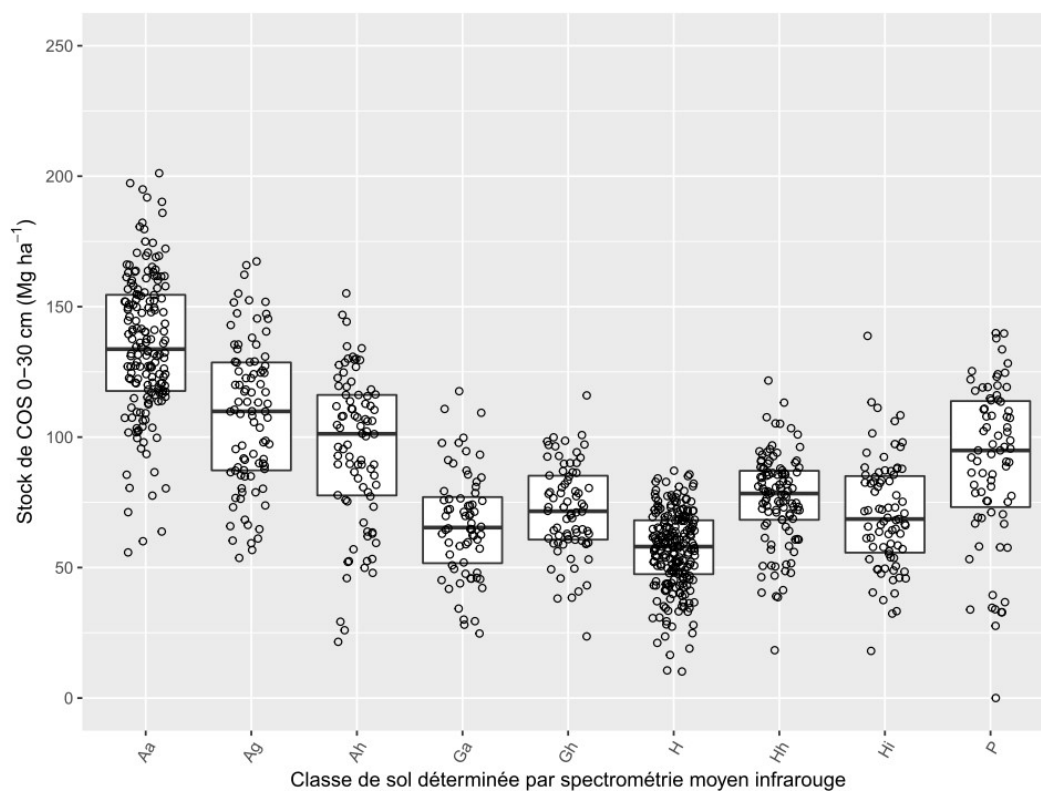


Figure 9. Stocks de COS selon la classe de sol spectral, sur 962 échantillons de la BDD d'analyses de sols du Cirad, cultivés majoritairement en canne à sucre (source des données : Allo, 2019)

3.4 Stocks de COS selon l'usage du sol

Les stocks de COS selon l'usage et le type de sol sont représentés en Figure 10. Le jeu de données correspondant est la population d'environ 8000 points de la BDD pour laquelle les stocks de COS ont été calculés. Cette représentation ne laisse pas apparaître de tendance évidente sur l'effet de l'usage par type de sol, en raison du déséquilibre du jeu de données considéré ici : la BDD contient en effet une grande majorité d'analyses de sols provenant de sols cultivés en canne à sucre. Ce déséquilibre, conjugué à la grande variabilité subsistant dans l'effet du type de sol spectral sur les stocks de COS pour les sols cultivés en canne à sucre, ne permet pas de mettre en évidence un effet de l'usage à l'échelle globale de La Réunion.

Les usages des sols et leurs changements conditionnent cependant de façon importante la dynamique temporelle des stocks de COS à La Réunion, mais ces effets ne peuvent être mis en évidence qu'à une échelle plus fine. La mise en évidence de ces effets est traitée dans la section 4 de cette synthèse.

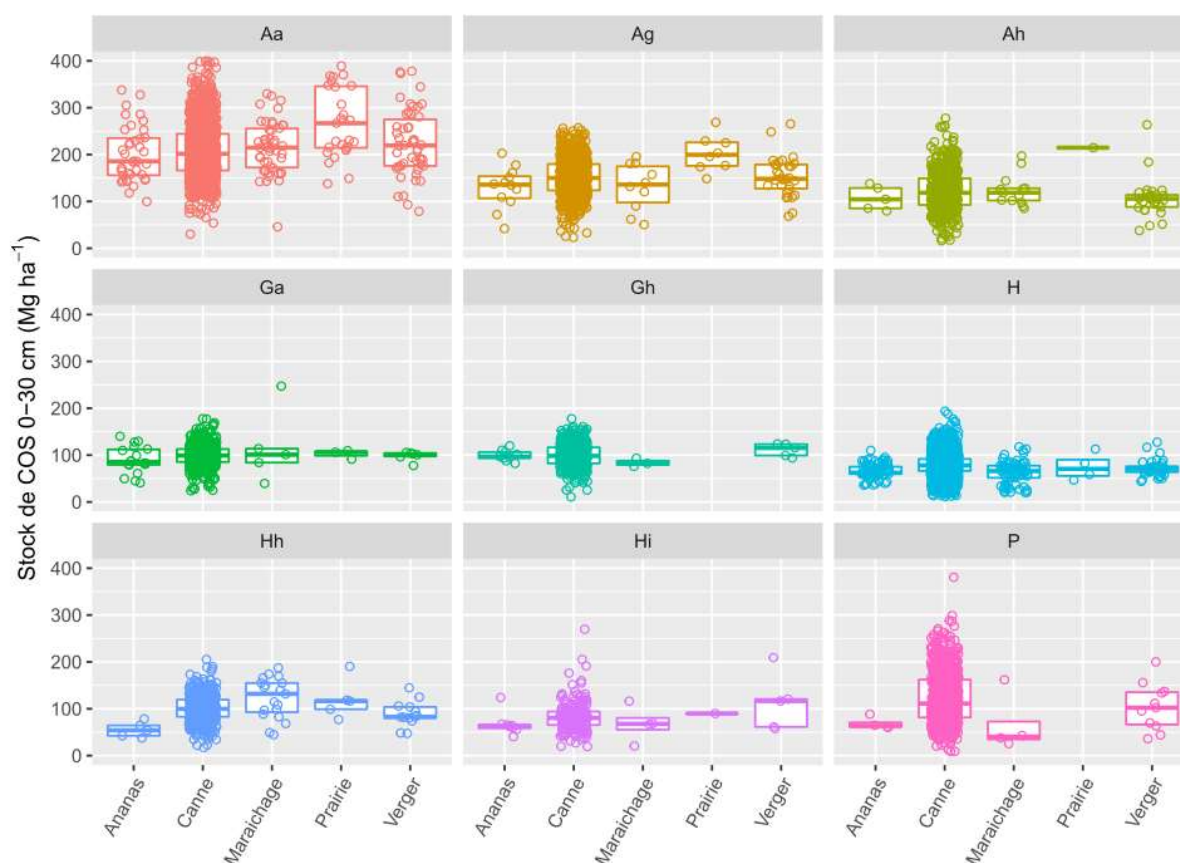


Figure 10. Stocks de COS selon l'usage et le type de sol spectral dans la BDD du Cirad à La Réunion. La minéralogie dominante des types de sol est décrite en Table 1 (source des données : Allo, 2019)

3.5 Spatialisation des stocks de COS

Les stocks de COS de La Réunion ont été spatialisés au cours du projet C@RUN (Allo, 2019 ; Todoroff et al., 2019). La méthode de spatialisation s'est déroulée selon plusieurs étapes :

- Des unités pédologiques homogènes spectrales ont été créées à partir du jeu de données de 8742 points de la BDD pour lesquels le type de sol spectral a été prédit (Figure 11). Les unités pédologiques spectrales ont été créées par la méthode des polygones de Voronoï. En raison de la création de très petites unités cartographiques par cette méthode, certains points de la BDD ont été supprimés afin de simplifier l'information et ne garder que des unités de superficie > 50 ha. La spatialisation des unités pédologiques a donc été effectuée à partir de 7222 points.
- Ces unités pédologiques spectrales ont été croisées avec des unités climatiques délimitées selon les critères du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), constituant une carte d'unités pédoclimatiques homogènes. Cette carte pédoclimatique a été croisée avec la carte des usages agricoles à La Réunion (Figure 12).
- Les stocks de COS moyens et leur écart-type ont été calculés pour l'ensemble des unités pédoclimatiques intersectées avec la carte des usages, permettant de cartographier les stocks de COS moyens par unité agropédoclimatique. La carte finale est représentée en Figure 13.

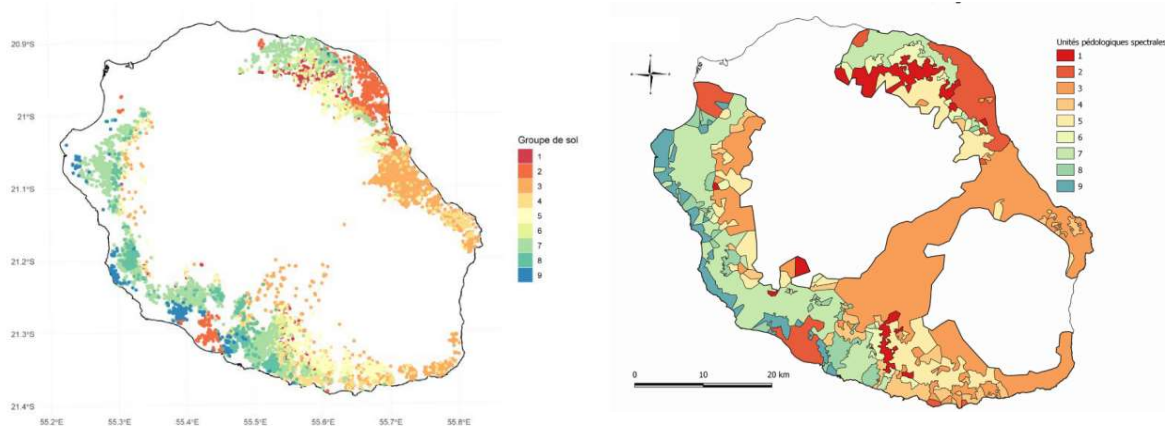


Figure 11. Spatialisation des 8742 points de la BDD avec le type de sol spectral associé, et cartographie des unités pédologiques spectrales générées par les polygones de Voronoï (Allo, 2019)

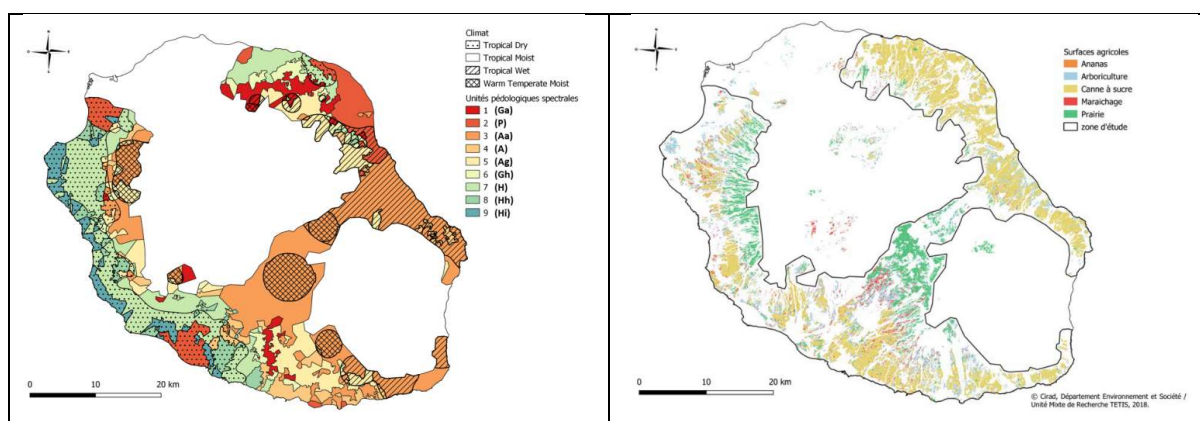


Figure 12. Carte des unités pédoclimatiques et carte des usages agricoles (Allo, 2019)

De façon logique, la variabilité spatiale des stocks de COS à La Réunion est largement reliée à la distribution des sols. Les stocks de COS les plus élevés sont localisés dans les régions d'altitude et sur le pourtour des volcans, correspondant aux sols andiques, cultivés en canne ou sous prairie (Figure 13). Les stocks de COS les plus faibles sont localisés sur le littoral ouest et nord, où dominent les sols riches en gibbsite et halloysite (sols bruns et ferrallitiques). L'incertitude est corrélée aux stocks moyens, elle est la plus élevée pour les sols andiques.

Sur l'ensemble du territoire agricole, plus de la moitié du stock de COS total est contenu dans les sols andiques du groupe spectral n°3 (Table 2), et près de la moitié du stock de COS total est contenu dans les sols cultivés en canne à sucre. Les prairies ne couvrent que 16% du territoire agricole, mais contiennent 26% du stock de COS total. Au total, les sols agricoles réunionnais contiennent 7,6 millions de Mg de C.

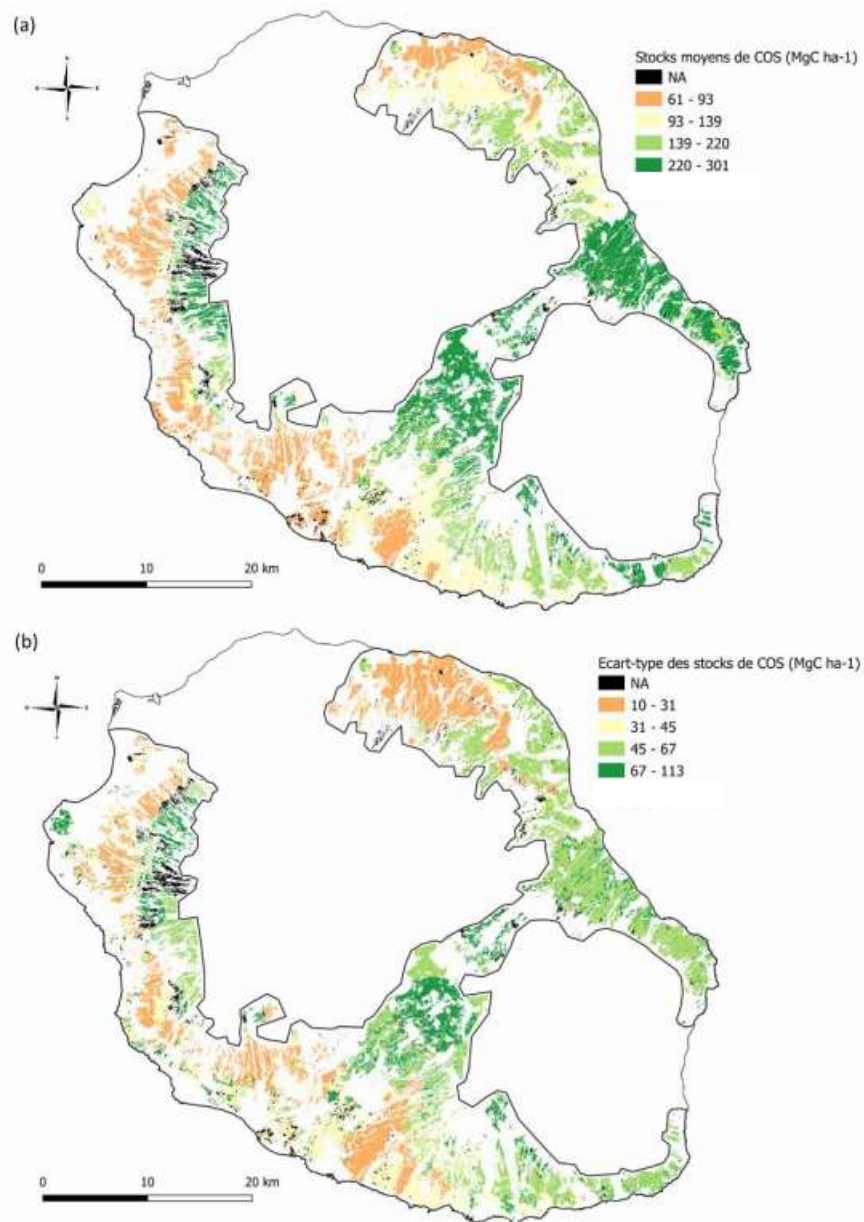


Figure 13. Carte des stocks de COS (a) et de leur écart-type (b) dans les sols agricoles de La Réunion (Allo, 2019)
Les deux grandes zones apparaissant en blanc sur les cartes n'ont pas été étudiées.

Groupe de sol	Quantité de COS		Surfaces		Usage	Quantité de COS		Surfaces	
	MgC	%	ha	%		MgC	%	ha	%
1	262 707	3	2 519	5	Ananas	52 490	1	470	1
2	455 386	6	3 660	8	Canne	3 527 490	47	25 671	55
3	4 236 520	56	17 125	37	Maraichage	419 454	6	2 894	6
4	331 323	4	2 605	6	Prairie	1 957 616	26	7 360	16
5	805 528	11	5 151	11	Arboriculture	1 597 033	21	10 141	22
6	212 252	3	2 103	5					
7	898 436	12	10 194	22					
8	238 166	3	1 944	4					
9	113 765	2	1 235	3					
Tous groupes de sol	7 554 083		46 536		Tous usages	7 554 083		46 536	

Table 2. Quantités de COS totales par groupe de sol et usage agricole (Allo, 2019)

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

4.1 Evolution tendancielle des teneurs en COS

L'analyse de la BDD d'analyses des sols du Cirad offre l'opportunité d'étudier l'évolution tendancielle des teneurs en COS au cours du temps dans les cultures de canne à sucre, étant donné que la date d'analyse est renseignée dans la BDD, et que certains îlots cultureux ont été échantillonnés à plusieurs reprises entre 1993 et 2017, sans que l'usage n'ait changé durant cette période (Figure 14).

Si quelques îlots voient leurs teneurs en COS baisser ou augmenter au cours du temps, dans la plupart des situations les teneurs en COS sont stables au cours du temps. Cette stabilité a amené à considérer les cultures de canne à sucre comme un usage de référence à La Réunion, étant donné leur implantation très ancienne sur l'île, débutée il y a environ 200 ans (Allo, 2019 ; Allo et al., 2017).

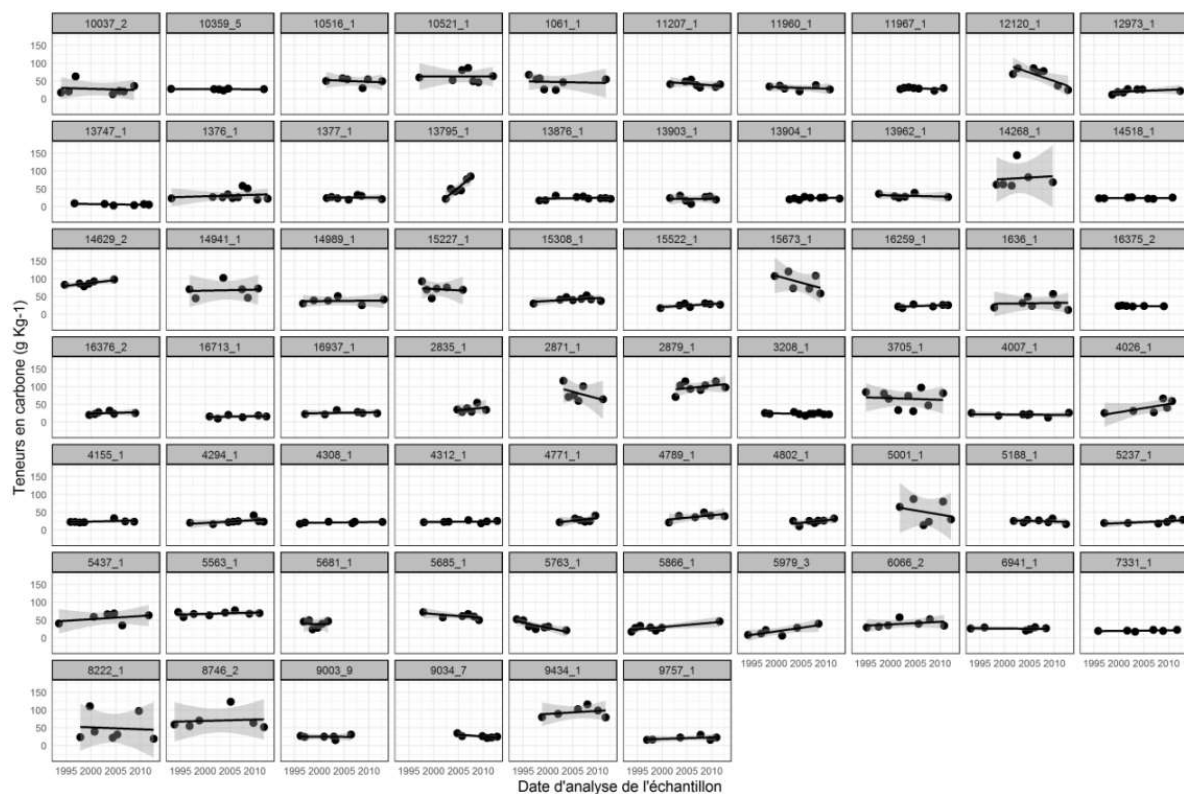


Figure 14. Evolution temporelle des teneurs en COS d'îlots de canne à sucre, échantillonnés à au moins 6 reprises entre 1993 et 2017 (Allo, 2019)

4.2 Effet des changements d'usage sur les variations de stocks de COS

L'effet des changements d'usage sur les variations de stocks de COS a été étudié au cours du projet C@RUN (Allo, 2019 ; Todoroff et al., 2019). Compte tenu du contexte agricole réunionnais et des données disponibles dans la BDD d'analyses de sol du Cirad, les transitions étudiées sont la conversion des surfaces cultivées en canne à sucre, considérées comme l'usage de référence et présentant des stocks de COS à l'équilibre, vers les autres usages agricoles de La Réunion, que sont les prairies, le maraîchage, l'arboriculture, et les cultures d'ananas. Comme cela a été montré en section 3.4, l'analyse régionale des stocks de COS selon l'usage et le type de sol ne permet pas d'évaluer l'effet de changements d'usage sur les stocks de COS.

De façon analogue aux travaux sur la spatialisation des stocks de COS, la démarche retenue a consisté à stratifier le territoire agricole réunionnais afin d'évaluer l'effet des changements d'usage. Les stocks de COS ont donc été comparés entre usages au sein d'unités pédoclimatiques homogènes (voir section 3.5 et Figure 12), mais celles-ci peuvent être distribuées dans plusieurs régions distantes les unes des autres. Afin de diminuer la variabilité au sein de ces unités pédoclimatiques, les différences de stocks de COS ont été comparées entre échantillons proches géographiquement au sein des unités pédoclimatiques. Ainsi, une zone tampon de 1km² a été définie autour de chaque échantillon d'usage différent que la canne à sucre. Les échantillons de sols sous canne à sucre ont été recherchés par requête spatiale dans ces zones tampon, et la différence de stocks de COS a été calculée entre les deux usages (calcul d'une moyenne des échantillons de canne à sucre si leur nombre >1). Les différences de stocks entre l'usage 'canne' et les autres usages ont ensuite été moyennées au sein de chaque unité pédoclimatique, et un test de Student a été appliqué afin de déterminer si les différences moyennes de stocks étaient significativement différentes de 0 (Allo, 2019).

En faisant l’hypothèse que les stocks de COS sont également à l’équilibre dans les usages autres que la canne, les différences de stocks de COS sont attribuées à un effet du changement d’usage de la canne vers l’autre usage identifié. 13 paires d’usages dans différentes unités pédoclimatiques ont été identifiées comme ayant des différences de stocks de COS significativement différentes de 0 (Figure 15) ; ces transitions concernent les cultures d’ananas, de maraîchage, et les prairies.

La quasi-totalité des transitions de la canne vers les autres usages entraîne une baisse des stocks de COS, excepté pour la transition canne-prairie dans l’unité pédoclimatique 3_TM (sols andiques sous climat tropical ‘moist’), qui correspond à des régions d’altitude, assez peu propice à la culture de la canne. Les restitutions de C sous canne seraient donc faibles, et inférieures à celles des prairies, expliquant l’augmentation importante des stocks constatée (+28%). En revanche, les transitions des cultures de canne vers les cultures maraîchères ou d’ananas entraînent systématiquement des diminutions des stocks de COS, comprises entre 11 et 44% du stock de COS mesuré sous canne à sucre. Ces diminutions peuvent être attribuées à la réduction des entrées de C arrivant au sol dans les cultures maraîchères et d’ananas comparé à celles sous canne à sucre, et à l’intensité du travail du sol dans les systèmes annuels, plus importante que dans les cultures de canne, dont le sol n’est travaillé qu’au moment de la replantation (tous les 10 ans en moyenne). Le type de sol semble influencer les variations de stocks de COS liées aux changements d’usage : en effet, la baisse des stocks de COS est moins sévère pour les sols des unités 6 et 7 (sols à gibbsite et halloysite), comparé aux sols des unités 3, 4, 5 (sols à allophanes), et 9 (sols vertiques à interstratifiés). Les sols andiques à allophanes et les Vertisols seraient donc des sols plus sensibles au changement d’usage que les sols bruns ou ferrallitiques.

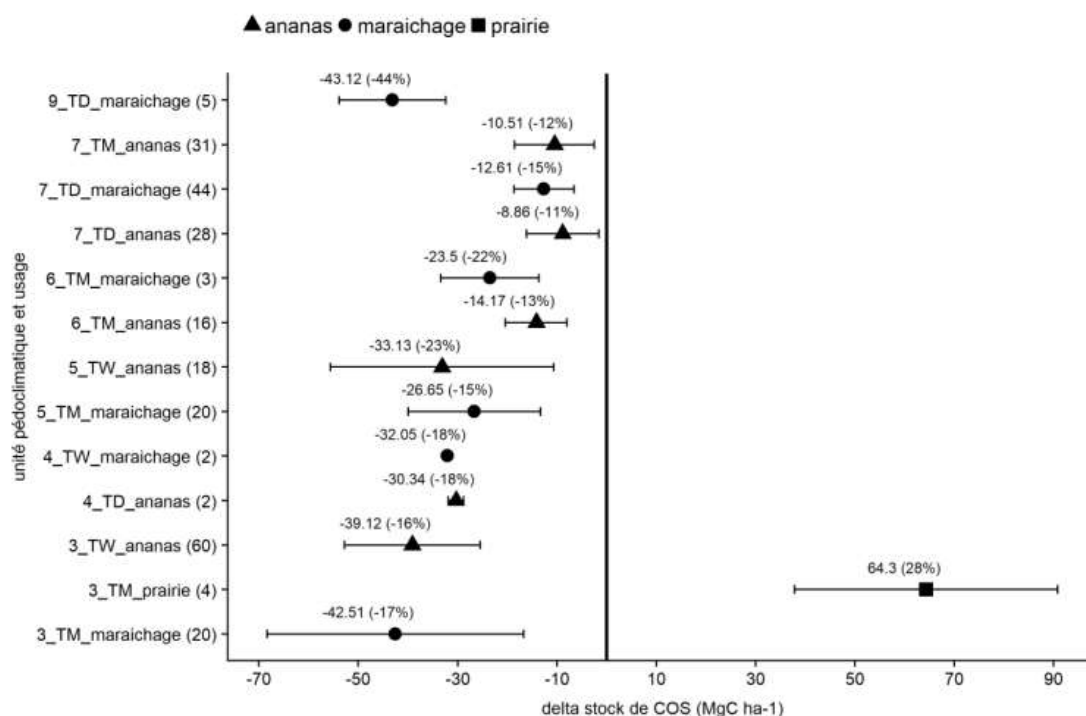


Figure 15. Différences moyennes de stocks de COS sur 0-30 cm de profondeur entre les cultures de canne et d’autres usages, significativement différentes de zéro par unité pédoclimatique (Allo, 2019)

Les nombres entre parenthèses sur l’axe des ordonnées correspondent au nombre d’échantillons des usages autres que la canne dans cette unité pédoclimatique. Les nombres entre parenthèses au-dessus des points du graphique correspondent à la variation en % du stock de COS sous canne à sucre. La minéralogie dominante des types de sols identifiés par un numéro est décrite en Table 1. Les abréviations des climats (classification IPCC) sont les suivantes : TD pour Tropical Dry, TM pour Tropical Moist, TW pour Tropical Wet.

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

5.1 Effet des pratiques de gestion dans les cultures pérennes

L'effet des pratiques de gestion sur les variations de stocks de COS dans les cultures de canne à sucre n'a pas fait l'objet d'études spécifiques à La Réunion. Les pratiques conventionnelles de gestion peuvent être déjà considérées comme conservatoires vis-à-vis du COS. Le sol est en effet rarement travaillé (en moyenne tous les 10 ans au moment de la replantation), et la gestion des résidus de culture favorise le maintien des stocks de COS, bien que le type de récolte influence la quantité de résidus laissés au sol (Pouzet et al., 2002). Les apports de C arrivant au sol sont donc variables, d'autant que la fertilisation azotée entraîne une diminution des quantités de C arrivant au sol par les racines, comparé à un témoin non fertilisé (Versini et al., 2020). Les interactions entre pratiques de gestion, apports de C arrivant au sol et dynamique du COS sous canne à sucre n'ont cependant pas été spécifiquement étudiées à La Réunion.

5.2 Effet des apports de produits résiduaux organiques

5.2.1 Effet sur les stocks de COS

L'apport au sol de produits résiduaux organiques (PRO) fait l'objet de nombreuses recherches à La Réunion, en raison du contexte insulaire et de l'opportunité de ces PRO de se substituer partiellement aux engrais chimiques importés (Jarousseau et al., 2016).

Les recherches sur l'effet de ces apports sur la dynamique du COS portent sur les variations quantitatives de stocks de COS mais également sur la distribution verticale du COS, et sur la stabilité du C issu des PRO (thèses en cours de Louis-Axel Edouard Rambaut et Floriane Jamoteau). Les données disponibles actuellement concernent l'effet d'apports de PRO sur les stocks de COS, et a été étudié sur 3 sites expérimentaux à La Réunion, occupés par des prairies permanentes et des parcelles de maraîchage (Jamoteau, 2018 ; Viaud, 2019). Ces sites sont situés à Saint-Joseph (sud de l'île), dans la région de la Plaine des Cafres, et sur le site des Colimaçons (Hauts de l'Ouest). Les caractéristiques des sites d'étude sont résumées en Table 3. Ces parcelles reçoivent des apports massifs de PRO, sous forme de lisier, fumier, ou compost de fumier.

Sites	Altitude (m)	Pluviométrie (mm/an)	Type de sol	Culture	PRO apportées	Quantités moyennes apportées (t C/ha/an)
St-Joseph	10	1000 - 1500	Arénosol	Prairie (Chloris)	CFB	7,9
					LB	18,6
Plaine des Cafres	1600	1500 - 2000	Andosol	Prairie (Ray-Grass, Dactyle, Brome)	CFB	7,2
					LB	17
Colimaçons	800	1280	Cambisol andique	Maraichages	CLP	3,9 puis 4
					FV	3,2 puis 4

Table 3. Caractéristiques des sites d'étude en prairie amendés par des produits résiduaux organiques (PRO) (Viaud, 2019)

CFB : compost de fumier de bovin ; LB : lisier de bovin ; CLP : compost de lisier de porc ; FV : fumier de volaille.

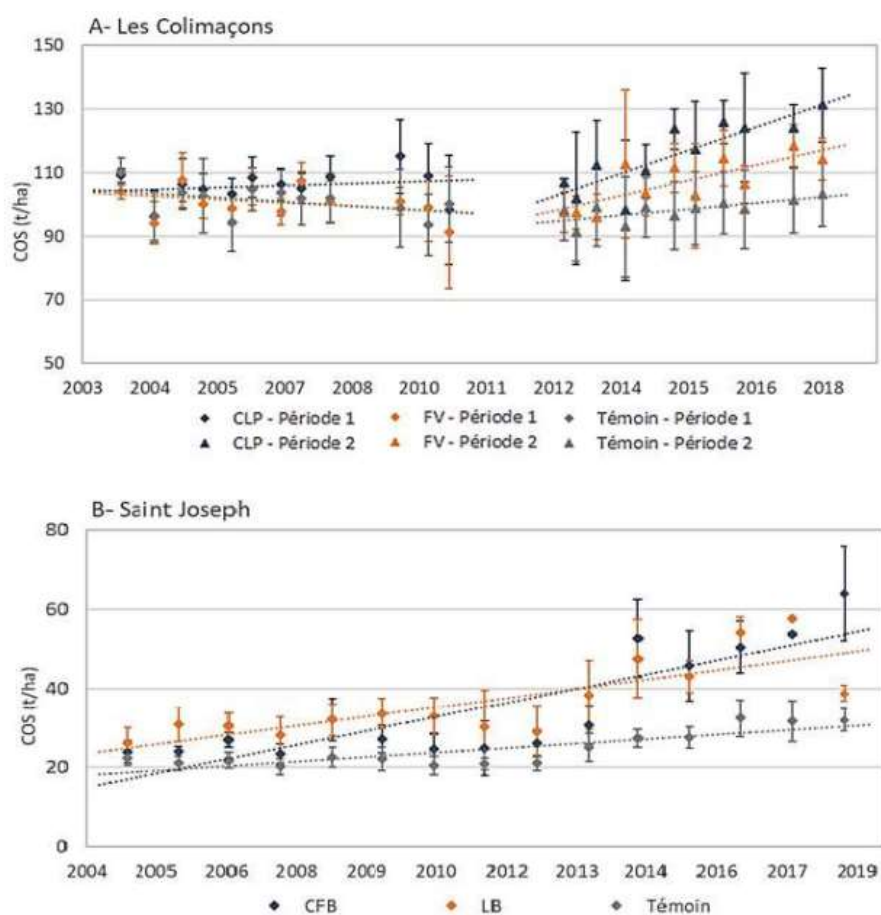
Sur ces sites, le suivi des stocks de COS est diachronique, les stocks de COS ont été mesurés au début de l'expérimentation, et jusqu'à environ 15 ans après des apports réguliers de PRO. Les stocks de COS ont été mesurés sur la couche 0-30 cm sur le site des Colimaçons et 0-15 cm sur les sites de Saint-Joseph et de la Plaine des Cafres.

Sur l'ensemble des sites, les stocks de COS ont augmenté à la suite de l'apport des PRO (Figure 16). Sur le site des Colimaçons, le taux de stockage de COS atteint à partir de 2013 est de 5,6 Mg COS ha⁻¹ an⁻¹ dans le cas du compost de lisier de porc, et 3,6 Mg COS ha⁻¹ an⁻¹ pour le fumier de volaille.

Sur l'essai de Saint-Joseph, les taux de stockage de COS sont les suivants : 0,84 Mg COS ha⁻¹ an⁻¹ pour le témoin, 1,38 Mg COS ha⁻¹ an⁻¹ pour le lisier de bovin, et 2,66 Mg COS ha⁻¹ an⁻¹ pour le compost de fumier de bovin.

Sur le site de la Plaine des Cafres, les taux de stockage de COS sont de 0,41 Mg COS ha⁻¹ an⁻¹ pour le lisier de bovin et de 1,38 Mg COS ha⁻¹ an⁻¹ pour le compost de fumier de bovin (données normalisées par rapport au témoin).

Dans l'ensemble des situations, l'apport de PRO sous forme de compost entraîne une augmentation des stocks de COS supérieure à celle des situations dans lesquelles le PRO est apporté sous forme de lisier. Cela s'explique par la labilité plus importante de la matière organique du lisier, dont une grande partie est rapidement décomposée et minéralisée à la suite de l'apport.



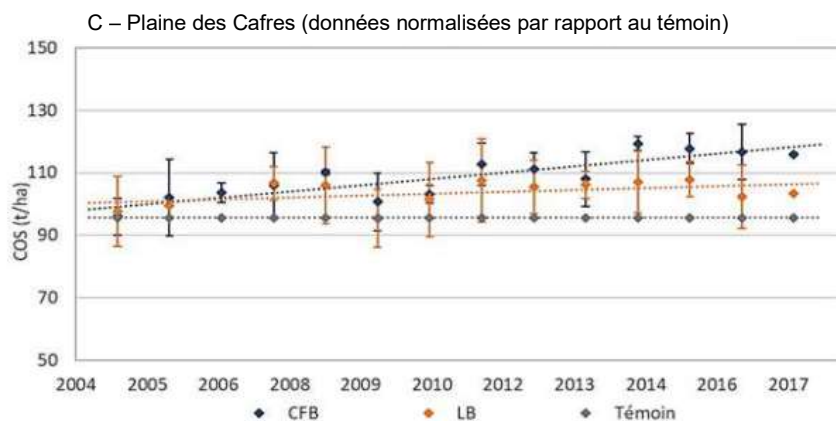


Figure 16. Evolution temporelle des stocks de COS sur les parcelles témoins et amendées des essais des Colimaçons, Saint Joseph, et de la Plaine des Cafres (Viaud, 2019)

Les abréviations des traitements sont décrites en Table 3. Pour le site de la Plaine des Cafres, les stocks de COS ont été normalisés par rapport au témoin.

Des analyses isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ ont été réalisées dans les sols de deux sites (Andosol de la Plaine des Cafres et Arénosol de Saint-Joseph), afin de suivre l'incorporation dans le sol du C provenant des amendements organiques (Jamoteau et al., 2021). Ces derniers ont en effet une signature isotopique différente de celle des apports de C provenant des graminées des prairies, offrant l'opportunité de distinguer les contributions des deux sources de C au stock de COS (Balesdent et al., 1987).

Le suivi de l'accumulation du C issu des amendements organiques dans les sols met en évidence plusieurs tendances (Figure 17). D'une part, à quantité équivalente de C apporté, la quantité de C incorporé dans le sol est plus importante dans l'Andosol que dans l'Arénosol : ce résultat souligne l'importante capacité des Andosols, riches en allophanes, à stabiliser du C. Les conditions climatiques pourraient également expliquer en partie cette tendance, avec des conditions de températures plus faibles dans le cas de l'Andosol, ralentissant la minéralisation de la matière organique. D'autre part, pour un même type de sol et à quantité d'apport équivalent, la quantité de C incorporé dans le sol diffère selon le type d'amendement. L'apport de compost permet une plus grande incorporation du C dans le sol comparé à l'apport de lisier. Cela pourrait être expliqué par le degré de minéralisation de ces apports, le lisier comportant plus de composés labiles facilement décomposables que le compost.

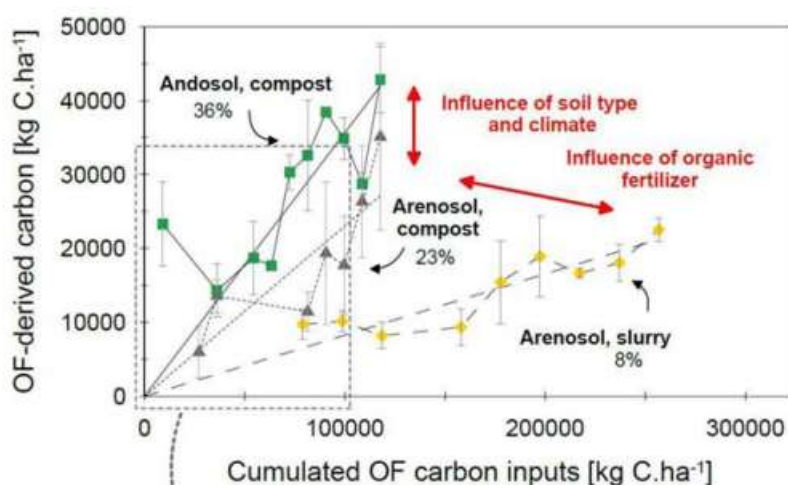


Figure 17. Accumulation du C issu des amendements organiques dans les sols en fonction des quantités de C apportées par ces amendements (Jamoteau et al., 2021)

5.2.2 Effet sur les émissions de N₂O

L'effet de l'apport d'amendements organiques dans des cultures de canne à sucre sur les émissions de N₂O et CO₂ a été étudié sur un site expérimental à La Réunion (SOERE PRO, site de La Mare, Sainte-Marie) (Kyulavski et al., 2019 ; Kyulavski, 2019). Plusieurs types d'apports ont été testés (urée, lisier de porc, boues de station d'épuration) en combinaison avec deux modalités d'apport en mulch de résidus de canne (5 vs 10 Mg ha⁻¹ an⁻¹ de matière sèche). La décomposition du mulch de canne n'a pas été affectée par l'apport de fertilisant (Kyulavski et al., 2019). Les émissions de N₂O associées aux apports de fertilisants décroissent dans l'ordre lisier de porc > urée > boues de station d'épuration (Figure 18). La forme liquide des amendements organiques favoriserait donc les émissions de N₂O.

Fig. 4 Mean absolute CO₂-C (a) and N₂O-N (b) fluxes and mean normalized CO₂-C (c) and N₂O-N (d) emissions over the first 14 days following N application for 10 t DM ha⁻¹ mulch + urea (U), 10 t DM ha⁻¹ mulch + pig slurry (PS), 10 t DM ha⁻¹ mulch + sewage sludge (DS), and 5 t DM ha⁻¹ of mulch + urea (U0.5), 5 t DM ha⁻¹ mulch + pig slurry (PS0.5). Normalized emissions were calculated by unit of initially added C or N. The bars on the graph indicate the standard errors of the mean (*n* = 3). Same letters on top of the bars indicate no significant difference at *p* = 0.05

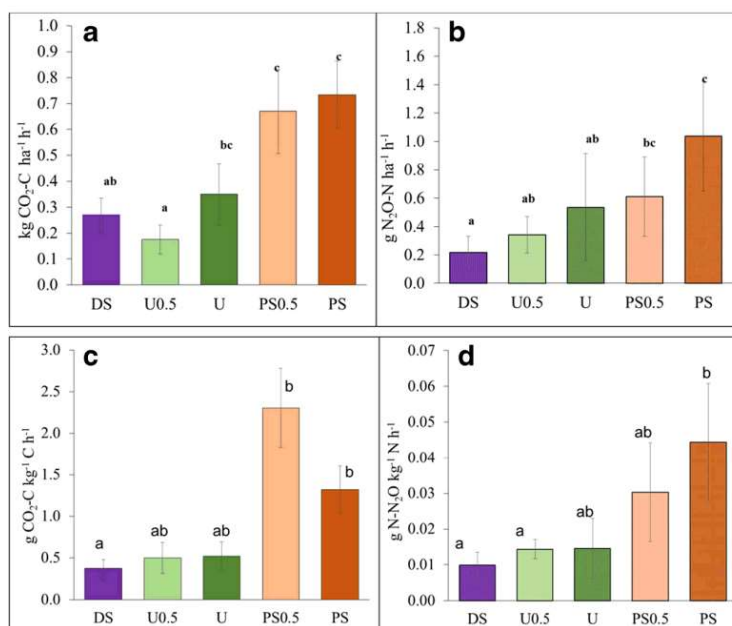


Figure 18. Emissions de CO₂ et N₂O jusqu'à 14 jours après application de fertilisants azotés sur des cultures de canne à sucre (Kyulavski et al., 2019)

6 Synthèse et perspectives

Les travaux réalisés à La Réunion sur le stockage de COS font émerger plusieurs tendances à prendre en compte dans une perspective de séquestration du COS sur ce territoire. D'une part les stocks de COS dans les sols agricoles sont élevés, en particulier dans les sols andiques et cultivés en canne à sucre. Cet usage est majoritaire dans le territoire agricole réunionnais, et permet de maintenir les stocks de COS à l'équilibre avec les pratiques conventionnelles actuelles. Le changement climatique pourrait néanmoins i) affecter les rendements de canne à sucre, avec des effets variables selon les régions de l'île (Christina, 2021) ; et ii) modifier les cinétiques de minéralisation de la matière organique, ce qui pourrait déstabiliser l'équilibre des stocks observés actuellement. D'autres dynamiques futures pourraient également modifier les flux de C arrivant au sol, entraînant des variations de stocks de COS. Les rendements de canne pourraient augmenter via une optimisation de la fertilisation (Christina et al., 2021), ce qui se traduirait par des restitutions de paille accrues. A l'inverse, la valorisation énergétique des pailles de canne pourrait entraîner une diminution des restitutions de paille ; dans cette perspective, différents scénarios d'exportation des pailles devraient donc être évalués afin de ne pas déstocker massivement le COS, comme cela a été évalué en Guadeloupe (Sierra et al., 2016).

Les stocks de COS agricoles sont sensibles aux changements d'usage : la transition des cultures de canne à sucre vers des cultures maraîchères et d'ananas provoque une diminution significative des stocks de COS, d'autant plus importante si les sols sont andiques. Les limites méthodologiques de l'évaluation des effets des changements d'usage consistent en l'absence de prise en compte des changements éventuels de la densité apparente à la suite du changement d'usage, et l'absence de données sur l'âge des transitions étudiées.

Le levier principalement étudié à La Réunion pour maintenir ou augmenter les stocks de COS agricoles est l'apport d'amendements organiques, d'origines agricole ou urbaine. Les données disponibles montrent que les amendements compostés présentent une meilleure efficacité de stockage de COS dans les sols que les amendements organiques liquides.

L'état des connaissances présenté dans cette synthèse met également en avant certaines situations pour lesquelles des données manquent, malgré des enjeux territoriaux importants :

- Les stocks de COS calculés à l'échelle régionale à partir de la BDD du Cirad ne prennent pas en compte la teneur en éléments grossiers, ce qui entraîne une surestimation des stocks de COS pour les sols peu évolués du sud-est de l'île, où la proportion massique d'éléments grossiers atteint en moyenne 35%. Des travaux sont actuellement en cours pour améliorer la qualité des données dans ces situations.

- La base de données étudiée dans le projet C@RUN contient peu d'analyses de sols cultivés en arboriculture ; par conséquent, l'effet des transitions depuis les systèmes de canne vers ces systèmes n'a pu être évalué, et l'effet des pratiques de gestion dans les vergers sur les stocks de COS n'a pas été étudié par ailleurs. Ces cultures pourraient pourtant être amenées à se développer dans les prochaines décennies si des politiques publiques favorables à l'autonomie alimentaire sont menées ; Marzin et al. (2021) ont estimé à environ 250 ha les surfaces nécessaires à mettre en culture pour atteindre l'autonomie alimentaire en matière de production d'agrumes.

- L'absence de données sur l'état des stocks de COS dans les forêts des Hauts de l'île empêche l'évaluation des changements de stocks de COS liés à la déforestation et l'installation de pâturages. 121 km² de forêts et espaces mixtes ont été convertis entre 1989 et 2002, majoritairement au profit de pâturages dans les Hauts (Lagabrielle et al., 2007).

- L'effet des pratiques de gestion dans les systèmes maraîchers sur les trajectoires des stocks de COS a été peu étudié à La Réunion, hormis l'effet de la fertilisation organique sur le site des Colimaçons. Bien qu'elles aient progressé au cours de la dernière décennie, les superficies des systèmes maraîchers sont encore modestes (environ 2000 ha en 2018).

7 Bibliographie

- Agreste, 2021. L'occupation du sol entre 1982 et 2018.
- Agreste La Réunion, 2019. Mémento 2019 Agricole et rural.
- 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.
- Allo, M., Albrecht, A., Legier, P., Goge, F., Jameux, M., Thuriès, L., Todoroff, P., 2017. Long-term diachronic series for soil carbon saturation evidence : A case study on volcanic soils of Reunion island under sugarcane crops. [WWW Document]. Abstr. Book Pedometrics 2017. URL <https://agritrop.cirad.fr/586933/> (accessed 4.28.21).
- Allo, M., Todoroff, P., Jameux, M., Stern, M., Paulin, L., Albrecht, A., 2020. Prediction of tropical volcanic soil organic carbon stocks by visible-near- and mid-infrared spectroscopy. *CATENA* 189, 104452. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104452>
- Balesdent, J., Mariotti, A., Guillet, B., 1987. Natural ¹³C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biol. Biochem.* 19, 25–30. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90120-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90120-9)
- Bart, F., 2016. Île de la Réunion, quelques enjeux environnementaux contemporains. *Dyn. Environnementales J. Int. Géosciences L'environnement* 120–139. <https://doi.org/10.4000/dynenviron.706>
- BRGM, 2006. Carte géologique de La Réunion à 1/100 000, Editions BRGM. ed.
- 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>
- Christina, M., 2021. Impact du changement climatique sur les rendements canniers dans les 50 prochaines années à La Réunion. <https://doi.org/10.18167/DVN1/D2BGDJ>
- Christina, M., Jones, M.-R., Versini, A., Mézino, M., Le Mézo, L., Auzoux, S., Soulié, J.-C., Poser, C., Gérardaux, E., 2021. Impact of climate variability and extreme rainfall events on sugarcane yield gap in a tropical Island. *Field Crops Res.* 274, 108326. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108326>
- Collinet, M., Feder, F., Soulié, J.-C., 2021. Soil analysis data from Laboratoire d'Analyses Agronomiques of Réunion Island CIRAD. Dataverse UR 78 Recycl. Risque. <https://doi.org/10.18167/DVN1/EAVAGM>
- Dupuy, S., 2018. Carte d'occupation du sol 2017 Spot6-7 (niveau 3) [WWW Document]. URL http://aware.cirad.fr/layers/geonode%3Aclassif_gabir_2017_postclas_code3_cor (accessed 10.21.21).
- Feder, F., Bourgeon, G., 2009. Mise à jour de la carte des sols de l'île de La Réunion. Démarche suivie et problèmes rencontrés. *Etude Gest. 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>
- Jamoteau, F., 2018. Contribution du carbone des produits résiduels aux matières organiques des sols de la Réunion. Une approche isotopique. (Rapport de Master 1 Hydrogéologie et transferts). Université de Poitiers.
- Jamoteau, F., Balesdent, J., Basile-Doesch, I., Tillard, E., Versini, A., 2021. Can stable isotopes quantify soil carbon build-up from organic fertilizers? *Isotopes Environ. Health Stud.* 57, 470–491. <https://doi.org/10.1080/10256016.2021.1946532>
- Jarousseau, H., David, D., DOELSCH, E., Farinet, J.-L., Feder, F., Guerrin, F., Medoc, J.-M., Queste, J., Paillat, J.M., Saint Macary, H., Sallote, B., Thuriès, L., Wassenaar, T., 2016. La Réunion : recyclage de PRO en milieu insulaire tropical, in: *Le Recyclage Des Produits Résiduels Organiques. Regards Sur Une Pratique Agro-Écologique.* Editions Quae, p. 276 p.
- Kyulavski, V., Recous, S., Garnier, P., Paillat, J.-M., Thuriès, L., 2019. Application of N Fertilizer to Sugarcane Mulches: Consequences for the Dynamics of Mulch

- Decomposition and CO₂ and N₂O Fluxes. *BioEnergy Res.* 12, 484–496. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10001-0>
- Kyulavski, V.D., 2019. Émissions de gaz à effet de serre et flux de carbone du sol associés aux mélanges de résidus de récolte et de produits résiduels organiques dans la culture de la canne à sucre. Université de La Réunion.
- Lagabrielle, E., Metzger, P., Martignac, C., Lortic, B., Durieux, L., 2007. Les dynamiques d'occupation du sol à la Réunion (1989-2002). M@ppemonde.
- 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.
- Pouzet, D., 2002. Caractérisation chimique des sols réunionnais : regroupement spatial homogène des données. s.n.
- Pouzet, D., Velle, A., Rassaby, A., 2002. Estimation des résidus de récolte de la canne à sucre : bilan des études menées au cours des campagnes sucrières 2000 et 2001 sur l'île de La Réunion. URL <https://agritrop.cirad.fr/489222/> (accessed 4.28.21).
- Raunet, M., 1988. Département de la Réunion. Carte morphopédologique au 1:50 000 en quatre feuilles. Cirad-Irat et Région Réunion.
- Sierra, J., Chopart, J.L., Guindé, 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>
- Thuriès, L., Moussard, G., Gauvin, M., Feder, F., Doelsch, E., Légier, P., 2013. Organic status of tropical soils predicted by near infrared spectroscopy: Réunion Island as a case study., in: NIR 2013 Proceedings of 16th International Conference on Near Infrared Spectroscopy: Picking up Good Vibrations. Citeseer, Montpellier, pp. 256–259.
- Todoroff, P., Albrecht, A., Allo, M., Thuries, L., Tillard, E., 2019. C@RUN : séquestration de carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, modélisation et potentiels d'atténuation du changement climatique. Cirad-IRD.
- Versini, A., Poultney, D., Bachir, H., Février, A., Paillat, J., 2020. Effect of nitrogen fertilisation on sugarcane root development and nitrogen accumulation in ratoon crops of Reunion Island. *Sugar Tech* 22, 1110–1121.
- Viaud, P., 2019. Modélisation de la dynamique de la matière organique des sols en contexte d'apport de produits résiduels organiques à La Réunion (Rapport de stage de Master II). Université de Lorraine.