THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Sciences agronomiques

École doctorale GAIA N°584

Unité de recherche UR AIDA-CIRAD

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'Ile de La Réunion.

Présentée par Myriam ALLO

Le 18 Décembre 2019

Sous la direction de Emmanuel TORQUEBIAU et Alain ALBRECHT

Devant le jury, présidé par Dominique SCHWARTZ, et composé de

Tantely RAZAFIMBELO, Professeure, Université d'Antananarivo	Rapportrice
Dominique SCHWARTZ, Professeur, Université de Strasbourg	Rapporteur
Katja KLUMPP, Ingénieure de recherche, INRA	Examinatrice
Jean-Luc CHOTTE, Directeur de recherche, IRD	Examinateur
Antoine PIERART, Ingénieur, ADEME	Invité
Pierre TODOROFF, Chercheur Dr, CIRAD	Invité
Emmanuel TORQUEBIAU, Chercheur HDR, CIRAD	Directeur de thèse
Alain ALBRECHT, Directeur de recherche, IRD	Co-directeur de thèse

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

Spécialité : Sciences Agronomiques

Ecole doctorale : École doctorale GAIA N°584

Laboratoire d'accueil : Unité de Recherches UR AIDA (CIRAD), UMR Eco&Sols (IRD)

Labellisation : Thèse labellisée #DigitAg

ALLO MYRIAM

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'Ile de La Réunion.

Octobre 2016 - Octobre 2019

Date de soutenance : 18 Décembre 2019

Composition du jury, présidé par Dominique SCHWARTZ :

Rapporteurs :

Tantely RAZAFIMBELO, Professeure, Université d'Antananarivo

Dominique SCHWARTZ, Professeur, Université de Strasbourg

Examinateurs :

Katja KLUMPP, Ingénieure de recherche, INRA

Jean-Luc CHOTTE, Directeur de recherche, IRD

Direction de thèse :

Emmanuel TORQUEBIAU, Chercheur HDR, CIRAD, Directeur de thèse

Alain ALBRECHT, Directeur de recherche, IRD, Co-directeur de thèse

Pierre TODOROFF, Chercheur Dr, CIRAD, Encadrant de thèse

Invité :

Antoine PIERART, Ingénieur, ADEME, référent ADEME

REMERCIEMENTS

Cette thèse s'est déroulée au CIRAD à La Réunion d'Octobre 2016 à Octobre 2019, en collaboration avec l'unité mixte de recherches Eco&Sols de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et l'unité AIDA (Agroécologie et Intensification Durable des Cultures Annuelles) du CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement). Elle a été co-financée par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), le CIRAD, le FEDER, la Région Réunion et l'Etat. De plus, ce travail de thèse s'est déroulé dans le cadre du projet de recherche C@RUN « séquestration de carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, modélisation et potentiels d'atténuation du changement climatique » (financement ADEME, CIRAD, IRD, Tereos).

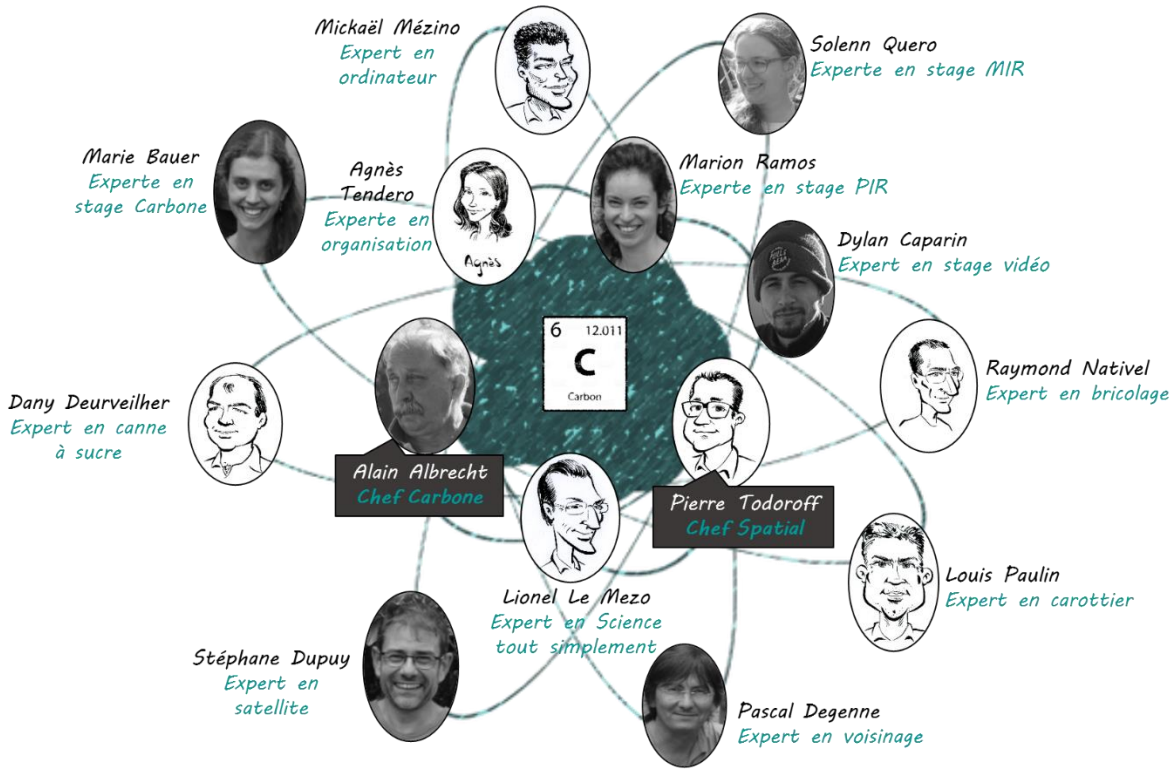
Maintenant que ce travail a été replacé dans son contexte, je peux enfin passer aux remerciements proprement dits, dont le paradoxe est qu'ils constituent la première page et la dernière étape de la rédaction d'un manuscrit de thèse. La rédaction d'un mémoire de thèse est effectivement la fin d'une période, il clôt trois années singulières, à la découverte du métier de chercheur. C'est donc le moment des remerciements parce que la recherche est avant tout collective. Me voilà donc, devant cette page blanche, à vouloir écrire quelques mots pour remercier tous ceux qui m'ont accompagné dans cette aventure réunionnaise.

MERCI, cinq lettres.

Pour Françoise Héritier, chaque lettre a sa propre signification (*Le goût des mots)* : M est pataud, E limpide, R carré tandis que C clabaude et I est infatué. Voilà donc une signification intéressante des remerciements mais je me lance…

Je remercie tout d'abord le destin qui, un jour de Septembre 2015, après un très long trajet en avion, passé à écouter les pérégrinations d'un très vieux monsieur, a mis une thèse sur ma route. Je dois donc remercier celui sans qui je n'aurai jamais eu la chance de faire une thèse et qui en fut le co-directeur : Monsieur Alain Albrecht. J'aimerais pouvoir retransmettre en quelques mots la confiance qu'il m'a accordée pour ce projet, les connaissances qu'il m'a transmises, le soutien qu'il m'a apporté tout au long de ces trois années, pour lui dire ma reconnaissance. J'aimerais également remercier M. Pierre Todoroff (co-encadrant) pour son encadrement au quotidien et son soutien indéfectible sans lequel le déroulement de cette thèse n'aurait pas été le même. Merci à M. Emmanuel Torquebiau (directeur de thèse) pour sa disponibilité au cours de ses trois dernières années et pour son aide dans le processus de la soutenance de thèse. Merci à Kenji Fujisaki et Tiphaine Chevallier pour leur aide dans ce travail de thèse.

Je remercie également chaleureusement toute l'équipe ARTISTS de l'unité AIDA du CIRAD à La Réunion, qui m'ont accueilli et aidé au quotidien dans de nombreux domaines (non répertoriés de manière exhaustive dans l'infographie, comme vous le constaterez sur la page suivante qui est au verso et que vous ne voyez donc pas encore). Merci à Agnès d'avoir été une collègue parmi des collègues, merci à Lionel de m'avoir consacré du temps malgré les exigences de la Science, merci à Mickaël de son soutien amical et informatique, merci à Pascal pour m'avoir supporté comme voisine de bureau, merci à Stéphane pour son occupation du sol, merci à Dany pour le partage de ses connaissances du milieu agricole, merci à Raymond pour ses talents de bricoleur et autres astuces, merci à Louis pour sa conduite sur les routes de l'île nous ayant menés vers le carbone des sols agricoles. Merci aux stagiaires qui ont aussi suivi ces routes avec nous : Marion, Solenn, Dylan et Marie, merci pour tout le travail réalisé et les bons moments partagés.



L'équipe des ARTISTS du carbone

Merci également à tous les collègues de la Station de Ligne Paradis du CIRAD pour avoir rendu le cadre de travail si agréable. Merci notamment aux experts de l'équipe Qualisud avec un merci tout particulier à M.Chillet pour son expertise ananas-linguistique. Merci aux collègues des unités QualiSud et Selmet qui m'ont apporté leur soutien technique : merci pour les dépannages techniques, qu'aurais-je fait si vous ne m'aviez pas prêté des petits pots pour nourrir la thèse ? Et merci à M.Nabeneza pour m'avoir apporté ses lumières en proche infra-rouge ! Merci aux autres doctorants, post-doctorants et VSC que j'ai croisé tout au long de ces 3 années.

Merci aux ami.e.s qui m'ont soutenue (et supportée) pendant cette belle aventure ! Merci aux ami.e.s de La Réunion qui ont fait cette thèse avec moi, en quelques sortes, alors merci Caro, Fred, Mathieu ! Merci aux ami.e.s venu.e.s me voir et merci aux ami.e.s ailleurs dans le monde qui m'ont soutenue à distance, avec un grand merci à Pauline du Cantal !

Je remercie également les membres du Jury d'avoir accepté de participer à la soutenance de thèse le 18 Décembre 2019. Merci aux professeur.e.s Razafimbelo et Schwartz d'avoir accepté d'être rapporteur.e. pour ma soutenance de thèse. Merci à Mme Klumpp et M.Chotte d'avoir accepté l'invitation pour être examinatrice.teur. Enfin, merci à toutes les personnes de l'encadrement de thèse et à M.Pierart Antoine, référent de l'ADEME, d'avoir été présents pour ce dernier jour de thèse.

Merci à tout.e.s d'avoir fait partie de cette aventure, pendant laquelle j'ai fait mon petit bonhomme de chemin. Je ne regrette pas d'avoir signer des deux mains même si la thèse est une œuvre de longue haleine où le temps s'escrime à détaler comme un lapin. Il faut commencer par prendre le taureau par les cornes sans mettre la charrue avant les bœufs, puis aller cahin-caha, et enfin mettre les bouchées double en espérant ne pas se retrouver dans les choux. C'est aussi se faire du mauvais sang, qui parfois ne fait qu'un tour, avoir le nez dans le guidon et finir à fond de train pour arriver à bon port. Mais je ne regrette pas non plus de ne pas avoir pris la poudre d'escampette car, même si je n'ai pas toujours été dans mes petits souliers, j'ai mis du cœur à l'ouvrage, dont je vous laisse dorénavant seul juge.

Merci zot tout !

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS i

TABLE DES MATIERES v

LISTE DES FIGURES xi

LISTE DES TABLEAUX xvii

PREAMBULE 1

CHAPITRE 1. INTRODUCTION GENERALE 7

1.1 Carbone, changement climatique et sol 7

1.1.1 Réservoirs et flux de carbone à l'échelle de la planète 7

1.1.2 Flux de GES du secteur agricole à l'échelle de la planète 8

1.1.3 Flux de GES et sols 9

1.1.4 Emissions de CO_2 et changement d'usage des terres à l'échelle de la planète 9

1.1.5 Lutter contre le changement climatique 9

1.2 Stocker du carbone organique dans les sols agricoles 10

1.2.1 Le carbone organique dans le sol : source et compartiments 10

1.2.2 Teneur et stock de carbone organique dans le sol 11

1.2.3 Atténuation du changement climatique par stockage de COS 12

1.2.4 Adaptation au changement climatique par stockage de COS 13

1.2.5 Dynamique de stockage de carbone organique dans le sol 14

1.2.6 Processus de stabilisation du carbone organique dans le sol 14

1.2.6.1 Facteurs biotiques de stabilisation du carbone organique dans le sol 15

1.2.6.2 Facteurs abiotiques de stabilisation du carbone organique dans le sol 16

1.3 Limiter les émissions de GES dues aux changements d'usage des terres 17

1.3.1 Changements d'usage des terres 17

1.3.2 Potentiel de stockage du carbone dans le sol 18

1.4 Recherche et gouvernance sur la séquestration du carbone dans le sol 19

1.4.1 La recherche scientifique sur la séquestration du carbone dans le sol 19

1.4.2 Gouvernance sur la séquestration du carbone du sol 19

1.4.2.1 Gouvernance internationale des Nations Unies 20

1.4.2.2 Une initiative internationale portée par la France : l'Initiative '4p1000' 21

1.4.2.3 Gouvernance à l'échelle nationale 23

1.4.2.4 Gouvernance à l'échelle territoriale 23

1.5 Mesure, Rapport et Vérification (MRV) 24

1.5.1 Mesure du stock de COS 24

1.5.2 Nouvelles méthodes pour l'étude des sols et du carbone organique du sol 25

1.5.3 Besoin, limites et potentialités pour les systèmes MRV 26

1.6 Objectifs et démarche 27

CHAPITRE 2. MILIEU, MATERIEL & METHODES 31
2.1 Milieu : La Réunion, une île volcanique et tropicale 31
2.1.1 Les facteurs de la pédogenèse en zone volcanique tropicale 31
2.1.1.1 Le facteur « p » : matériel minéral parental ou roche mère 33
2.1.1.2 Le facteur « r » : un relief abrupt 35
2.1.1.3 Le facteur « Cl » : une île de la zone intertropicale avec une variété de climats 35
2.1.1.4 Le facteur « o » : les organismes vivants 37
2.1.1.5 Le facteur « t » : le temps 37
2.1.1.6 Des séquences de sol résultant de tous ces facteurs 38
2.1.2 Des sols étudiés depuis les années 1960 40
2.1.2.1 Des sols cartographiés 42
2.1.2.2 Une minéralogie étudiée 43
2.1.3 Les sols agricoles 45
2.2 Matériel : Analyses de sols géoréférencées sur le territoire réunionnais 46
2.2.1 Base d'analyses de sol de La Réunion 46
2.2.2 Jeux de données 48
2.2.2.1 Données de terrain et spectres proche et moyen infra-rouge 48
2.2.2.2 Données d'analyses de sol du laboratoire et spectres moyen infra-rouge 50
2.3 Méthodes 52
2.3.1 Méthodes de caractérisation des constituants des sols et des propriétés spectrales 52
2.3.1.1 Mesures et analyses de sol 52
2.3.1.2 Acquisition de spectres proche et moyen infrarouge 52
2.3.2 Analyses des données 54
2.3.2.1 Outils de fouille de données 54
2.3.2.1.1 Boosted regression trees 54
2.3.2.1.2 Random forest 54
2.3.2.2 Chimiométrie 54
2.3.2.2.1 Prétraitements des spectres infrarouge 55
2.3.2.2.2 PLSR 56
2.3.2.2.3 Partitionnement par k-medoids 56
2.3.2.3 Spatialisation et systèmes d'information géographique 56
2.3.2.4 Calculateur EX-ACT 57

CHAPITRE 3. PREDICTION DES STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE DES SOLS VOLCANIQUES TROPICAUX PAR SPECTROSCOPIE PROCHE ET MOYEN INFRAROUGE 61
3.1 Introduction 64
3.2 Materials and methods 65
3.2.1 Study sites across a wide range of tropical volcanic soils 65
3.2.2 Fast and undisturbed soil sampling 66
3.2.3 Laboratory analyses 67
3.2.4 Spectrum acquisition and analysis 68
3.2.4.1 Instrument and data acquisition 68
3.2.4.1.1 Vis-near-infrared diffuse reflectance spectroscopy 68
3.2.4.1.2 Mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy 68
3.2.4.2 Spectrum analysis 69
3.3 Results 70

3.3.1 Laboratory analyses show wide range of SOC contents 70
3.3.2 Good accuracy of partial least squares regression models 71
3.3.3 Soil mineralogy revealed by spectra analyses 73
3.4 Discussion 76
3.4.1 Rare and in situ SOC stocks predictions by infrared spectroscopy 76
3.4.2 A mineralogical control of SOC stocks behind the prediction of SOC stock by near- and mid-infrared spectroscopy? 78
3.4.2.1 Can bulk density be predicted from amorphous products? 78
3.4.2.2 Can amorphous products be predicted by infrared spectroscopy? 79
3.5 Conclusion 80

CHAPITRE 4. ACCEDER AU POTENTIEL DE STOCKAGE DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICOLES REUNIONNAIS GRACE AUX OUTILS DE LA SPATIALISATION ET DE LA SPECTROSCOPIE MOYEN INFRAROUGE 87
4.1 Méthodologie utilisée pour une nouvelle classification des sols agricoles de La Réunion utilisant la spectroscopie moyen infrarouge 87
4.1.1 Analyse spatiale et fouille de données 87
4.1.1.1 Analyse spatiale des teneurs en carbone organique du sol sous canne à sucre 87
4.1.1.2 Déterminants du carbone organique du sol (COS) 89
4.1.1.3 Variabilité des teneurs en carbone organique du sol sous canne à sucre 90
4.1.1.4 Stabilité des teneurs en carbone organique du sol sous canne à sucre 92
4.1.2 Classification non supervisée par partitionnement « k-medoids » 93
4.1.2.1 Dichotomie des sols volcaniques tropicaux de La Réunion 96
4.1.2.2 Subdivision des sols à caractère andique (1er groupe) en 5 groupes par k-medoids 98
4.1.2.3 Subdivision des sols à caractère non andique (2ème groupe) en 4 groupes par k-medoids 104
4.1.3 Spatialisation des unités pédologiques spectrales 109
4.1.3.1 Définition de la zone d'étude 109
4.1.3.2 Méthodologie de spatialisation par Random Forest 110
4.1.3.3 Comparaison des méthodes de spatialisation 115
4.2 Territoire hétérogène et variabilité du carbone des sols : stratification et spatialisation pour évaluer les effets des changements d'usages sur les stocks de carbone organique des sols agricoles de l'île de La Réunion 117
4.2.1 Introduction 118
4.2.2 Matériel & Méthode 119
4.2.2.1 Données 119
4.2.2.1.1 Site d'étude et analyses de sol 119
4.2.2.1.2 Des données spatialisées 121
4.2.2.2 Analyses des données spectrales 123
4.2.2.2.1 Prétraitements et modèles de prédiction par spectroscopie IR 123
4.2.2.2.2 Classification des sols à partir des données spectrales 124
4.2.2.3 Outils de fouille de données et de spatialisation 125
4.2.2.4 Calculs des stocks et Δstocks de carbone organique du sol 125
4.2.3 Résultats 126
4.2.3.1 La stratification du territoire, une méthodologie nécessaire pour l'évaluation des stocks de COS 126

4.2.3.1.1 Signature spectrale et minéralogie 126
4.2.3.1.2 Variables chimiques 128
4.2.3.1.3 Structure spatiale et comparaison des classifications de sol 129
4.2.3.1.4 Nomenclature des unités pédologiques spectrales 131
4.2.3.1.5 Résultat de la stratification : les unités pédoclimatiques 132
4.2.3.2 Les stocks (MgC ha^{-1}) et quantités de carbone (MgC) organique des sols agricoles par unité pédoclimatique 134
4.2.3.3 Les Δstocks de carbone organique du sol entre usages agricoles par unité pédoclimatique 135
4.2.4 Discussion 137
4.2.4.1 Une variabilité des teneurs en carbone organique du sol diminuée par la prise en compte des facteurs biophysiques dans la stratification du territoire 137
4.2.4.2 Des stocks de carbone organique du sol élevés à La Réunion 138
4.2.4.3 La stratification du territoire : évaluer les effets des changements d'usage sur les stocks de carbone organique du sol 140
4.2.4.3.1 Des stocks de carbone organique du sol vulnérables aux changements d'usages 140
4.2.4.3.2 Des effets de changements d'usage difficiles à évaluer en raison de l'hétérogénéité spatiale du carbone 141
4.2.4.3.2.1 Biais géographique : une hétérogénéité spatiale résiduelle 141
4.2.4.3.2.2 Biais de l'échantillonnage 142
4.2.5 Conclusion 142

CHAPITRE 5. BILANS GAZ A EFFET DE SERRE (GES), CHANGEMENTS D'USAGES AGRICOLES ET TERRITOIRE HETEROGENE : UNE APPROCHE SPATIALE 153
5.1 Introduction 155
5.2 Matériel & Méthodes 156
5.2.1 Site d'étude et données 156
5.2.2 Principe du calculateur EX-ACT 158
5.2.3 Deux approches du territoire 158
5.2.4 Collecte de données pour le calculateur EX-ACT 159
5.2.5 Flux de carbone du sol 159
5.2.6 Scénarios de changements d'usages des terres 160
5.3 Résultats 161
5.3.1 Impacts des changements d'usages sur les stocks de COS 161
5.3.2 Impacts des changements d'usage sur les bilans GES par approche spatiale 163
5.3.2.1 Les unités pédoclimatiques concernées par des changements d'usages 163
5.3.2.2 Les émissions de GES dans la configuration actuelle des usages des terres 164
5.3.2.3 Quantification et identification des sources principales des émissions de GES 165
5.3.2.4 Bilan des émissions de CO_2 de la biomasse et du sol 166
5.3.2.5 Comparaison de l'approche par unité pédoclimatique (Spatiale) et de l'approche générale du territoire (Globale et ∑UPC) 168
5.4 Discussion 171
5.4.1 Limites de l'étude : un fort besoin de données spatialisées 171
5.4.2 Limites du calculateur EX-ACT 172

5.4.3 Comparaison de l'approche par unité pédoclimatique et de l'approche générale du territoire 174
5.5 Conclusion 174

CHAPITRE 6. DISCUSSION GENERALE 185
6.1 Synthèse des résultats obtenus et mise en perspective 187
6.1.1 Méthodologie d'estimation du stock de COS par spectroscopie proche et moyen infrarouge 187
6.1.1.1 Des mesures de terrain complémentaires des stocks de COS et des acquisitions spectrales en proche et moyen infrarouge au laboratoire et in situ 187
6.1.1.2 Un taux d'éléments grossiers à prendre en compte dans le calcul du stock de COS 189
6.1.2 Quantification des stocks de COS des sols agricoles 189
6.1.2.1 Définition des unités pédologiques spectrales 189
6.1.2.2 Spatialisation et cartographie des stocks de COS à La Réunion 190
6.1.2.3 Quantification des stocks de COS des horizons profonds 190
6.1.3 Évaluation des variations de stocks de COS entre modes d'usages agricoles 191
6.1.3.1 Un besoin d'analyses de sol supplémentaires pour les autres modes d'usages que la canne à sucre 191
6.1.3.2 Un besoin de mesures sur le terrain pour évaluer les variations de stock de COS dues aux changements d'usages 191
6.1.3.3 Un besoin de mesures isotopiques ^{13}C pour étudier la dynamique du COS 192
6.1.4 Bilan GES suite à des scénarios de changements d'usages des terres agricoles 192
6.1.4.1 Un besoin de données spatialisées pour une approche territoriale du bilan de GES 193
6.1.4.2 Des scénarios très simples à faire évoluer 193
6.1.4.3 Un besoin de nouvelles approches méthodologiques 194
6.2 L'initiative '4p1000' : quel potentiel de stockage de COS pour les sols agricoles de La Réunion ? 194
6.2.1 Le potentiel de stockage de COS des sols agricoles de La Réunion 194
6.2.2 Quels leviers pour stocker plus de carbone organique dans les sols agricoles de La Réunion ? 195
6.2.2.1 Leviers d'augmentation du stock de COS et limites biophysiques du stockage (biomasses, nutriments) 195
6.2.2.1.1 Augmenter les apports endogènes de carbone organique 195
6.2.2.1.2 Augmenter les apports exogènes de carbone organique 196
6.2.2.1.3 Stocker du COS en profondeur ? 197
6.2.2.2 Risques de pertes de COS et d'émissions concomitantes de GES 198
6.2.2.2.1 Des risques liés aux apports de COS et d'intrants 198
6.2.2.2.2 Des risques de sur-minéralisation liés au « priming effect » 198
6.2.2.2.3 Des risques de pertes par minéralisation due au travail du sol 199
6.2.3 Stocker du COS mais pour combien de temps ? 199
6.2.3.1 Un stockage limité… 200
6.2.3.2 … jusqu'à saturation ? 200
6.2.3.3 Un stockage réversible ? 201

6.2.3.4 Quel est le temps de résidence du COS qui constitue le stock de COS des sols agricoles de La Réunion ? 201
6.2.3.5 Remonter le temps en manipulant les associations organo-minérales pour stocker plus de COS ? 202
6.2.3.6 Quel potentiel de stockage de COS avec le changement climatique ? 202
6.2.3.7 Quel stockage de COS face à une urbanisation croissante ? 203
6.2.4 Quelle « compensation théorique » des émissions de GES par une augmentation de 4‰ du stock de COS des sols agricoles dans l'horizon 0-30 cm ? 204

CONCLUSION GENERALE 205

BIBILIOGRAPHIE 207

RESUME 221

ABSTRACT 223

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Réservoirs et flux de carbone, valeurs moyennes annuelles pour la période 2009-2018, exprimés en gigatonnes de carbone ($GtCO_2$), extrait de Friedlingstein et al. (2019) 7
Figure 1.2 : Répartition des émissions annuelles de GES totales et du secteur AFAT (IPCC, 2019)..... 8
Figure 1.3 : Sol et flux de GES, extrait de Bispo et al. (2017) 9
Figure 1.4 : Matières organiques du sol : nature et proportions indicatives, en masse, (d'après Calvet et al., 2011), extrait de Pellerin et al. (2019)..... 10
Figure 1.5 : Compartiments du carbone du sol en fonction de son temps de renouvellement, adapté de Derrien et al. (2016) 11
Figure 1.6 : Teneur en COS (gC pour 100g sol, exprimée en %) en fonction de la profondeur du sol, extrait de Torn et al. (1997)..... 12
Figure 1.7 : Les différents processus contrôlant le stockage de carbone dans les sols, extrait de Chenu et al. (2014) 13
Figure 1.8 : Les fonctions des matières organiques du sol, d'après Chenu (2016)..... 13
Figure 1.9 : Chaines de biotransformations des matières organiques dans le sol (d'après Lehmann and Kleber, 2015), extrait de Pellerin et al. (2019) 15
Figure 1.10 : Variations des stocks de COS (%) pour différents types de changements d'usages dans les tropiques, adapté de Don et al. (2011) 17
Figure 1.11 : Dynamique d'augmentation du stock de COS suivant un changement d'usage ou de pratiques agricoles (augmentation des entrées ou diminution des sorties de carbone organique), extrait de Chenu et al. (2019)..... 18
Figure 1.12 : Nombre de publication sur la séquestration du carbone des sols agricoles entre 1990 et 2016, extrait de Smith et al. (2018)..... 19
Figure 1.13 : Initiative 4p1000 et ODD liés à la séquestration du carbone dans le sol..... 21
Figure 1.14 : Activités de R&D contribuant à l'évaluation et au suivi des variations de SOC, extrait de Smith et al. (2019) 26
Figure 1.15 : Structuration du manuscrit de thèse autour des questions scientifiques 28
Figure 2.1 : Localisation de La Réunion 31
Figure 2.2 : Principes généraux de la pédogenèse, d'après Gobat et al. (2003)..... 32
Figure 2.3 : Carte géologique de La Réunion (BRGM, 2006) 33
Figure 2.4 : Température moyenne annuelle (a) et pluviosité annuelle (b) 36
Figure 2.5 : Carte d'occupation du sol (Dupuy, 2018)..... 37
Figure 2.6 : Schéma d'évolution des sols sur dépôts pyroclastiques en fonction du climat et du temps 38
Figure 2.7 : Séquence de sols sur matériaux volcanique de l'île de La Réunion d'après Feder and Bourgeon (2009)..... 38
Figure 2.8 : Andosolisation et désandosolisation des Andosols allophaniques, d'après Legros (2007) 39
Figure 2.9 : Comparaison synthétique des études pédologiques réalisées sur un versant Ouest de l'île de La Réunion, extrait de (Feder and Bourgeon, 2009) Préfixes utilisés : vi (vitric), an (andic), sn (silandic), ha (haplic), le (leptic). Groupe de sols de référence utilisés : AN (Andosols), PZ (Podzols), UM (Umbrisols), CM (Cambisols), PH (Phaeozems)..... 41
Figure 2.10 : Carte morpho-pédologique de La Réunion (Raunet, 1991) (a) et carte des sols simplifiée (Pouzet, 2002) (b)..... 43
Figure 2.11 : Composition minéralogique des séquences de sols étudiées (horizons Sa des andosols et B des sols brunifiés), [o : absence, ? : incertitude, * : présence, ** : abondance], extrait de Perret (1992) 44

Figure 2.12 : Cartographie simplifiée des analyses RX réalisées en 2018 44
Figure 2.13 : Carte des surfaces agricoles de La Réunion 45
Figure 2.14 : Répartition des surfaces agricoles par usage (a) et par type de sol (b) 46
Figure 2.15 : Localisation des échantillons de sols prélevés entre 1993 et 2017 à La Réunion 46
Figure 2.16 : Nombre d'échantillons de sol prélevés par année et par culture 47
Figure 2.17 : Nombre d'échantillons de sol prélevés par année et par type de sol (Pouzet, 2002) 47
Figure 2.18 : Principales variables descriptives des analyses de sol de la base de données 48
Figure 2.19 : Localisation des sites de prélèvement 48
Figure 2.20 : Prélèvement d'une carotte de sol sous canne à sucre en 2016 : Utilisation du carottier motorisé à percussion pour prélever la carotte de sol (a) et extraction de la carotte de sol (gouge de 1m) par un dispositif de levier (b) 49
Figure 2.21 : Cartographie des 7 949 échantillons de sol sous canne à sucre 50
Figure 2.22 : Cartographie des 8 742 échantillons de sol 51
Figure 2.23 : Acquisition de spectres PIR directement sur la carotte de sol sur le terrain (a) et au laboratoire sur échantillon séché, tamisé à 2 mm (b) 53
Figure 2.24 : Spectromètre FTIR portatif Agilent 4300 utilisé pour l'acquisition de spectres MIR au laboratoire (a) sur échantillon séché, tamisé et broyé à 200 µm (b) 53
Figure 3.1 : Location of 'La Réunion' and study sites locations on the island. 66
Figure 3.2 : In situ extraction of soil core (a) and in situ measurement of VNIR spectra (b) 67
Figure 3.3 : XRD patterns of powder preparation from three soil samples (Ferralsol, Cambisol, Andosol). The distance 'd' (in nm) was calculated according the Bragg's law ($\lambda = 2d\sin\theta$) 71
Figure 3.4 : Measured vs. predicted SOC content, bulk density and SOC stock of the best prediction models by mid-infrared spectroscopy (MIR) and visible-near-infrared spectroscopy (VNIR lab) in the laboratory and in the field (VNIR field). Soil types were represented with different symbols on the graphs. 73
Figure 3.5 : Mean mid-infrared spectra by soil type (a) and regression coefficients of the MIR PLSR models for the prediction of SOC content, bulk density and SOC stock using absorbance spectra (SNV) (b) 74
Figure 3.6 : Mean near-infrared spectra by soil type (a) and regression coefficients of the VNIR PLSR models in the laboratory for the prediction of SOC content, bulk density and SOC stock using raw absorbance spectra (b) 75
Figure 3.7 : Measured vs. predicted bulk density values. The predicted values were obtained by PLSR model from amorphous products (Alo, Feo, Sio, Alp and Fep) 79
Figure 4.1 : Cartographie des teneurs en COS (a) et de la capacité d'échange cationique (CEC) (b) des 7949 échantillons de sol 88
Figure 4.2 : : Importance relative des déterminants du carbone organique du sol calculée par l'algorithme BRT 89
Figure 4.3 : Teneurs en carbone organique du sol (gC kg^{-1}) des 7949 échantillons de sol en fonction de leur date d'analyse au laboratoire 90
Figure 4.4 : Teneurs en carbone (gC kg^{-1}) en fonction du temps par type de sol (Pouzet, 2002) 90
Figure 4.5 : Teneurs en COS (gC kg^{-1}) en fonction du temps par type de sol (Raunet, 1991) 91
Figure 4.6 : Teneurs en carbone (g Kg^{-1}) en fonction du temps (a) et cartographie des teneurs en carbone (g Kg^{-1}) (b) de l'unité « 54 » (Raunet, 1991) 91
Figure 4.7 : Teneurs en carbone (g Kg^{-1}) en fonction du temps par ilot de canne à sucre ayant au moins 6 analyses de sol réalisées depuis 1993 92
Figure 4.8 : Carte des teneurs en COS et de la CEC des 962 échantillons de sol utilisés pour la classification non supervisée 94

Figure 4.9 : Spectre MIR moyen par groupe de sol (a) et indicateur « Oxalfe » (g kg^{-1}) (b) par groupe de sol 96
Figure 4.10 : ACP des spectres MIR (a) et des produits amorphes (b) selon 2 groupes de sol 97
Figure 4.11 : Cartographie des 2 groupes de sol 98
Figure 4.12 : Indicateur « Oxalfe » (g kg^{-1}) (a) et densité apparente (g cm^{-3}) (b) par groupe de sol à caractère andique 99
Figure 4.13 : Spectre MIR moyen par groupe de sol (a) et Analyse en Composante Principale des spectres MIR (b) des sols à caractère andique 100
Figure 4.14 : Analyse en composante principale des produits amorphes (a) et des variables chimiques (b) des sols à caractère andique 101
Figure 4.15 : Teneurs en carbone organique du sol (a) et capacité d'échange cationique (CEC) (b) par groupe de sol à caractère andique 102
Figure 4.16 : Cartographie des échantillons des groupes de sol à caractère andique (groupe de sol de 1 à 5) selon la classification spectrale (a) et selon la classification morpho-pédologique simplifiée (b) 103
Figure 4.17 : Indicateur « Oxalfe » (g kg^{-1}) 104
Figure 4.18 : Spectre MIR moyen par groupe de sol (a) et Analyse en Composante Principale des spectres MIR (b) des sols à caractère non andique 105
Figure 4.19 : Analyse en Composante Principale des produits amorphes (a) et des variables chimiques (b) des sols à caractère non andique 106
Figure 4.20 : Teneurs en carbone organique du sol (a) et capacité d'échange cationique (CEC) (b) par groupe de sol à caractère non andique 107
Figure 4.21 : Cartographie des échantillons des groupes de sol à caractère non andique (groupe de sol de 6 à 9) selon la classification spectrale (a) et selon la classification morpho-pédologique simplifiée (b) 108
Figure 4.22 : Zone d'étude (a) et unités pédologiques spectrales cartographiées à partir des 962 points du jeu de données ayant un spectre MIR et un groupe de sol associé (b) 110
Figure 4.23 : Corrélogramme des co-variables (a) et hiérarchisation de l'importance des co-variables dans le modèle randomForest (b) 111
Figure 4.24 : Cartographie des 8742 échantillons de sol selon leur groupe de sol 112
Figure 4.25 : Boxplot des teneurs en carbone (gC kg^{-1}) des 962 (a) et des 7780 échantillons (b) par groupe de sol 113
Figure 4.26 : Partitionnement de l'espace en cellules de Voronoï 113
Figure 4.27 : Cartographie des unités pédologiques spectrales à partir des 8742 échantillons (a) et des 7222 échantillons (b) 114
Figure 4.28 : Répartition des échantillons classés selon la méthode UPS rf par unité pédologique spectrale UPS rfs 115
Figure 4.29 : Teneurs en carbone (gC kg^{-1}) par méthode de cartographie des unités pédologiques spectrales à partir de la classification spectrale « UPScs « (a), du Random Forest « UPSrf » (b) ou à partir du Random Forest simplifié « UPSrfs » (c) 116
Figure 4.30 : Localisation de La Réunion et cartographie des teneurs en carbone du sol des 8 742 échantillons de la base de données 120
Figure 4.31 : Carte morpho-pédologique simplifiée de La Réunion 121
Figure 4.32 : Carte des unités climatiques de l'IPCC de La Réunion 122
Figure 4.33 : Carte d'occupation des sols agricoles de La Réunion 122
Figure 4.34 : Spectres MIR moyens (a) et ACP des spectres MIR (b) par groupe d'échantillons de sol obtenus par la classification spectrale 127

Figure 4.35 : Boxplot des teneurs en allophanes (a) et de l'indicateur « Oxalfe » (b) par groupe d'échantillons de sol obtenus par la classification spectrale 128
Figure 4.36 : Boxplot des teneurs en carbone (gC kg^{-1}) (a) et de la capacité d'échange cationique (CEC) (cmol kg^{-1}) (b) par groupe d'échantillons de sol obtenus par la classification spectrale 129
Figure 4.37 : Cartographie de la classification spectrale non supervisée (a) et de la classification morpho-pédologique simplifiée (b) 130
Figure 4.38 : Carte des échantillons de la base de données classés selon leur unité pédologique spectrale 132
Figure 4.39 : Cartographie des 29 unités pédoclimatiques 133
Figure 4.40 : Carte des stocks moyens de COS (MgC ha^{-1}) (a) et de leur écart-type (MgC ha^{-1}) (b) ... 134
Figure 4.41 : Différence moyenne de stock de COS (Δstocks) (MgC ha^{-1}) (sur 0- 30 cm de profondeur) significativement différente de zéro par unité pédoclimatique et usage avec intervalle de confiance à 95%. Le nombre d'échantillons 'autre usage' utilisé pour calculer la moyenne des différences de stocks de COS par unité pédoclimatique et usage est indiqué entre parenthèses sur l'axe des ordonnées. Le pourcentage indiqué entre parenthèses sur le graphique à droite du Δstock moyen correspond au coefficient de variation par rapport au stock de canne à sucre. 136
Figure 4.42 : Coefficients de variation des teneurs en COS par type de sol pour la carte morpho-pédologique simplifiée (a) et pour la carte des unités pédologiques spectrales (a). Les effectifs sont indiqués entre parenthèses 138
Figure 5.1 : Localisation de La Réunion (a) et cartographie des teneurs en carbone des échantillons de la base de données (b), des sols agricoles (c), et des unités pédoclimatiques (d) de La Réunion, utilisés dans cette étude 157
Figure 5.2 : Démarche globale de l'utilisation du calculateur EX-ACT au sein d'une unité pédoclimatique pour l'évaluation du bilan GES lié aux changements d'usage des terres à la Réunion 161
Figure 5.3 : Différence moyenne de stock de cos (δstock) (mgC ha-1) (sur 0- 30 cm de profondeur) significativement différente de zéro par unité pédoclimatique et usage avec intervalle de confiance a 95%. Le nombre d'échantillons 'autre usage' utilise pour calculer la moyenne des différences de stocks de cos par unité pédoclimatique et usage est indiqué entre parenthèses sur l'axe des ordonnées. Le pourcentage indique entre parenthèses sur le graphique à droite du δstock moyen correspond au coefficient de variation par rapport au stock de canne à sucre. 162
Figure 5.4 : Cartographie des unités pédoclimatiques considérées dans EX-ACT 164
Figure 5.5 : Emissions annuelles de GES, dans la configuration actuelle des usages des terres, selon les deux approches du territoire (spatiale et générale) 164
Figure 5.6 : Bilans des émissions annuelles de GES par composante (poste d'émissions) des 4 scénarios de changements d'usages des terres sur l'ensemble des 10 unités pédoclimatiques 165
Figure 5.7 : Bilans des émissions annuelles de GES par type de GES des 4 scénarios de changements d'usages des terres sur l'ensemble des 10 unités pédoclimatiques 166
Figure 5.8 : Bilans des émissions annuelles de GES (tCO2eq ha-1 an-1), pour chaque scénario de changements d'usages, selon une approche par unité pédoclimatique (Spatiale) ou une approche générale du territoire (∑UPC et Globale) 168
Figure 5.9 : Bilans des émissions annuelles de GES du scénario 'tt-canne' par composante (a) et par type de GES (b) selon les trois méthodes 169
Figure 5.10 : Bilans des émissions annuelles de GES du scénario 'Gol' par composante (a) et par type de GES (b) selon les trois méthodes 170
Figure 5.11 : Schéma conceptuel de l'évaluation de la différence de stock de COS par approche synchronique dans l'hypothèse d'un déstockage de COS dans la situation générale théorique (a) et dans la situation de cette étude (b) 172

Figure 5.12 : Emissions annuelles de GES (des compartiments Bétail et Intrants) du secteur agricole selon différentes sources 173
Figure 6.1 : Schéma de synthèse de la méthodologique employée et des principaux résultats obtenus pour répondre aux objectifs de la thèse 186
Figure 6.2 : Cartographie des sites de prélèvements réalisés pendant les campagnes de terrain réalisées en 2016 et pendant la thèse en 2017 et 2018 188
Figure 6.3 : Schéma d'évolution du stock de COS suite à un changement de gestion, d'après Chenu (2016) et Barré et al. (2017) 199
Figure 6.4 : (a) Répartition de l'origine des surfaces nouvellement artificialisées entre 2006 et 2012, extrait de Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer (2016) et évolution de la SAU de 1980 à 2014 (b) , extrait de DAAF La Réunion (2015) 203
Figure 6.5 : Emissions de GES (CO2, CH4, N2O, HFC, SF6) de 1990 à 2017 à La Réunion, extrait de CITEPA (2019). 204

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Description des sites de prélèvement 49
Tableau 2.2 : Description des jeux de données décrits dans le manuscrit 52
Table 3.1 : Descriptive statistics of soil variables for each soil order (Andosols, Cambisols and Ferralsols) and for the total set (95 samples): mean, standard deviation, minimum, maximum 70
Table 3.2 : Calibration and cross-validation results of soil organic carbon content (SOC content), bulk density (BD), soil organic carbon stock (SOC stock) predictions by partial least squares regression (PLSR) models with leave-one-out cross validation, using visible-near-infrared (VNIR) and mid-infrared (MIR) diffuse reflectance spectra 72
Table 3.3 : Calibration and cross-validation results using the best pre-processing methods to predict amorphous products (Alo, Feo, Sio, Alp, Fep, allo, allophanes). Partial least squares regression (PLSR) models were developed with leave-one-out cross validation using visible-near-infrared (VNIR) and mid-infrared (MIR) diffuse reflectance spectra 79
Tableau 4.1 : Statistiques descriptives des 7949 analyses de sol extraites de la base de données..... 87
Tableau 4.2 : Statistiques descriptives des 962 analyses de sol..... 95
Tableau 4.3 : Table de contingence entre la carte morpho-pédologique simplifiée (Pouzet, 2002) et les 2 groupes de sol 98
Tableau 4.4 : Table de contingence entre la carte morpho-pédologique simplifiée (Pouzet, 2002) et les groupes de sol à caractère andique, numérotés de 1 à 5 104
Tableau 4.5 : Table de contingence entre la carte morpho-pédologique simplifiée (Pouzet, 2002) et les groupes de sol à caractère andique, numérotés de 6 à 9 109
Tableau 4.6 : Statistiques descriptives des variables chimiques des 7780 échantillons de sol 110
Tableau 4.7 : Matrice de confusion (groupe de sol mesuré vs. prédit) et erreur estimée par groupe de sol sur les 962 d'échantillons 112
Tableau 4.8 : Effectifs par unité pédologique spectrale réalisées suivant les 3 méthodes de cartographie 115
Tableau 4.9 : Coefficients de variations des teneurs en COS des 3 méthodes de cartographie des unités pédologiques spectrales..... 116
Tableau 4.10 : Statistiques descriptives des analyses de sol de la base de données..... 121
Tableau 4.11 : Modèles de calibration et de validation croisée de la densité apparente et des produits amorphes par PLSR à partir de 95 spectres MIR 124
Tableau 4.12 : Table de contingence entre les unités pédologiques spectrales et la carte morpho-pédologique simplifiée 131
Tableau 4.13 : Statistiques descriptives et dénomination des unités pédologiques spectrales..... 132
Tableau 4.14 : Quantités de COS par unité pédologique spectrale et par usage agricole..... 135
Tableau 4.15 : Comparaison des stocks de COS par classe de sol et par climat IPCC 138
Tableau 4.16 : Comparaison des stocks de COS (MgC ha^{-1}) dans les Antilles 139
Tableau 4.17 : Différence de stocks de COS (Δstock = Stock COS autre usage - Stock COS canne à sucre) moyenne (en MgC ha^{-1}) significativement différente de zéro, par unité pédoclimatique, et calculée sans adopter une approche par buffer. 142
Tableau 5.1 : Données et facteurs d'émissions Tier 2 renseignés dans le calculateur EX-ACT pour cette étude 159
Tableau 5.2 : Description des unités pédoclimatiques et stocks de COS renseignés dans l'outil EX-ACT. Les différences de stocks (MgC ha-1) sont indiquées entre parenthèses..... 163

Tableau 5.3 : Emissions annuelles de GES en tCO2eq an-1 ha-1 par composante pour les 4 scénarios selon une approche par unité pédoclimatique (méthode Spatiale) et une approche générale du territoire (méthodes ΣUPC et Globale) 166
Tableau 5.4 : Bilans des émissions annuelles de GES en tCO2eq an-1 ha-1 par gaz à effet de serre et leur compartiment d'origine pour les 4 scénarios selon une approche par unité pédoclimatique (méthode Spatiale) et une approche générale du territoire (méthodes ΣUPC et Globale) 167
Tableau 5.5 : Différence de stocks de carbone du sol (MgC ha-1) par unité pédoclimatique et usage 171

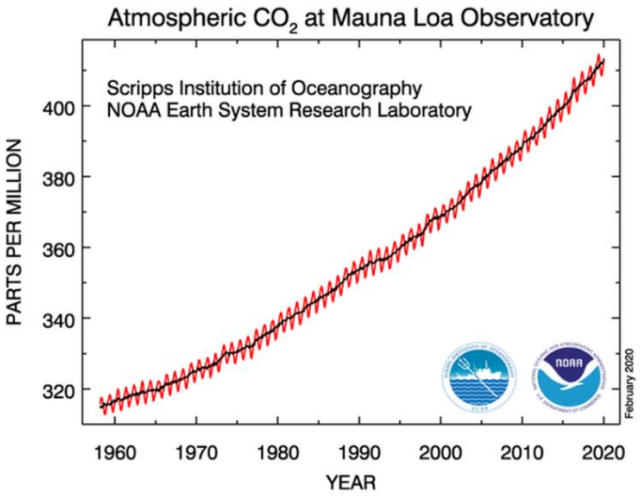
PREAMBULE

Une brève histoire du carbone…

Le changement climatique, lié à l'augmentation des teneurs de Gaz à Effet de Serre (GES) (dont les principaux sont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O)) est aujourd'hui l'objet d'un consensus scientifique et sociétal. Déjà en 1896, Svante Arrhenius, un scientifique suédois avait calculé qu'un doublement du CO_2 dans l'atmosphère ferait fondre les glaces de l'Arctique. En 1932, le physicien américain Hulburt de l'institut naval de recherche confirme ces résultats. Mais tout cela resta purement théorique jusqu'à ce qu'un ingénieur anglais, Guy Callendar ne réunissent les preuves que le CO_2 et la température augmentaient de concert en 1938. En 1960, Carl Sagan expose dans sa thèse de doctorat le premier schéma de l'emballement de l'effet de serre sur Vénus. Durant toute sa carrière, il va s'intéresser à l'atmosphère des planètes dont la Terre. En effet, lors de leurs formations, Vénus et la Terre avait une quantité équivalente de carbone provenant des éruptions volcaniques sur les deux planètes. Aujourd'hui, Vénus est une véritable fournaise recouverte de nuages d'acide sulfurique. La Terre, non. La différence ? Le dioxyde de carbone. Sur Vénus, les nuages d'acide sulfurique empêchent les rayons du soleil d'atteindre la surface de la planète mais certains arrivent tout de même à traverser ces nuages et sont piégés. Leur énergie est emprisonnée par l'atmosphère chargée en CO_2 : c'est l'effet de serre. Un effet de serre très important qui fait de Vénus une planète où la température à sa surface est de + 465°C.

A contrario, sur Terre, le CO_2 émis par les volcans dans l'atmosphère a été stocké dans un coffre-fort géologique : les roches. Les volcans ont saturé l'atmosphère en CO_2, que les océans ont peu à peu absorbé. Ce sont ensuite des microalgues unicellulaires, qui, au fil des millions d'années, en ont fait de minuscules coquilles qui se sont accumulées pour former d'épais dépôts de grès ou de calcaires au fond de l'océan. D'autres organismes ont également converti le CO_2 pour former les récifs coralliens. L'océan, lui-même a transformé le CO_2 dissous dans ses eaux pour former du calcaire. Une quantité infime de CO_2 est alors resté dans l'atmosphère de notre planète, 0.03% (300 ppmv) ("COSMOS : Une odyssée à travers l'univers," 2014).

En 1958, Charles David Keeling, océanographe, élabore une méthode pour mesurer précisément le carbone de l'atmosphère. Depuis, la teneur en CO_2 atmosphérique est mesurée en continu à l'observatoire de Mauna Loa (Hawaii) situé en plein Océan Pacifique à 4000 m d'altitude, et donc loin de tout facteur (centre industriel, urbain, forêts) susceptible d'influer localement sur la teneur en CO_2.



Or la concentration de CO_2 atmosphérique est passée de 315 ppmv en 1959 à 410 ppmv en 2019. Cela est très loin des niveaux ayant accompagnés le développement de l'agriculture et des civilisations. Le prélèvement des carottes de glace dans les profondeurs du Groenland et de l'Antarctique a montré que la quantité de CO_2 dans l'air n'a jamais dépassé les 0.03 % jusqu'à la révolution industrielle grâce à l'analyse de l'air emprisonné dans les couches de glace durant les 650 000 dernières années.

Chaque année, notre civilisation rejette plus de 30 milliards de tonnes de CO_2 dans l'atmosphère (environ 9 milliards de tonnes de carbone) par an en brûlant du pétrole, du charbon et du gaz. A titre de comparaison, les volcans émettent chaque année environ 500 millions de tonnes de CO_2 dans l'atmosphère ce qui correspond à moins de 2% des émissions anthropiques. Mais les causes du changement climatique ne s'expliquent pas exclusivement comme une conséquence secondaire de la modernité. Comme l'explique Jean-Baptiste Fressoz, historien au CNRS, « à chaque transformation des systèmes énergétiques, il y avait des voies technologiques prometteuses qui n'ont pas été choisies ». A la charnière du 18 et 19ème siècle, l'entrée dans l'Anthropocène trouve son origine dans une histoire plus politique de l'exploitation de l'homme, associé à la destruction de l'environnement, qui ne s'est pas faite dans un monde où les risques pour l'environnement étaient inconnus. L'intérêt du concept de l'Anthropocène est aussi de resituer l'impact de l'homme sur l'environnement à une échelle de temps géologique et non pas uniquement humaine. Dire que la quantité de CO_2 dans l'atmosphère est passée de 280 ppm à l'époque préindustrielle à 410 ppm en 2019 n'a pas le même impact que dire que nous n'avons pas eu de telles quantités de CO_2 dans l'atmosphère depuis 3 millions d'années.

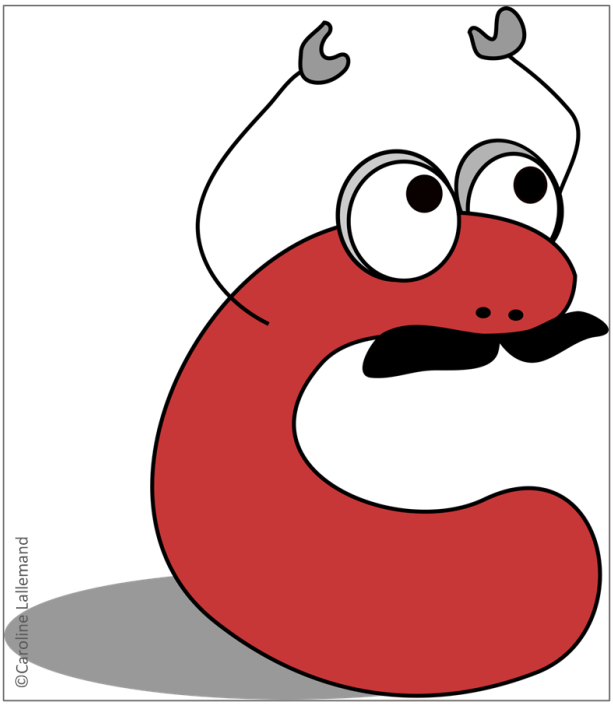
En 1980, Carl Sagan tirait la sonnette d'alarme : *« Nous libérons d'énormes quantités de dioxyde de carbone, ce qui accroit l'effet de serre. Il ne faut sans doute pas grand-chose pour rompre l'équilibre climatique de notre planète, pour transformer ce paradis en (…) en un enfer ».* En 1988, James Hansen alertait également sur l'élévation des températures, et montrait que le réchauffement global allait dépasser la variabilité naturelle du climat. L'année 1988 est aussi l'année de création du GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) qui est l'organe des Nations Unies chargé d'évaluer les travaux scientifiques consacrés aux changements climatiques. Le GIEC a pour mission de fournir aux décideurs, à intervalles réguliers, des évaluations scientifiques liées aux changements climatiques, à leurs conséquences et aux risques qu'ils peuvent poser à l'avenir, et de présenter des stratégies d'adaptation et d'atténuation. Les rapports du GIEC sont aujourd'hui fondamentaux dans les négociations internationales portant sur les mesures à prendre pour faire face au changement climatique.

Le dernier rapport spécial du GIEC (IPCC, 2019) daté d'Août 2019 et intitulé « Changement climatique et terres émergées : rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres » stipule que les terres émergées, et notamment le compartiment sol, sont une ressource fondamentale, soumises aux pressions des êtres humains et du changement climatique mais aussi un élément de la solution au changement climatique. Le rapport montre qu'une meilleure gestion des terres peut contribuer à faire face aux changements climatiques, bien qu'il soit essentiel de réduire les émissions de gaz à effet de serre de tous les secteurs pour maintenir le réchauffement mondial bien en dessous de 2 °C si ce n'est à 1,5 °C.

Les liens entre changement climatique et terres émergées sont très forts car le sol contient du carbone (sous forme organique et inorganique) en quantité deux à trois fois plus importante que dans l'atmosphère (sous forme de CO_2). Un relargage du carbone contenu dans les terres émergées vers l'atmosphère est un véritable enjeu vis-à-vis du changement climatique.

Dans ce cadre, connaitre les stocks de carbone des sols est essentiel, et de nombreux travaux de recherches visent à les quantifier à différentes échelles sur l'ensemble de la planète. En France, les stocks de carbone organique du sol ont été quantifiés grâce à la présence du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) sur tout le territoire métropolitain (Arrouays et al., 2003; Tosser et al., 2014). Des travaux de recherches ont également été réalisés dans les départements d'outre-mer, notamment dans les Antilles (Blanchart and Bernoux, 2005 (Martinique); Brossard et al., 2018 (Guyane); Sierra et al., 2015 (Guadeloupe)). Cette thèse s'inscrit, quant à elle, dans le cadre du projet C@RUN (Todoroff et al., 2019) visant à étudier la séquestration de carbone dans les sols agricoles de La Réunion.

CHAPITRE 1



CHAPITRE 1. INTRODUCTION GENERALE

1.1 Carbone, changement climatique et sol

1.1.1 Réservoirs et flux de carbone à l'échelle de la planète

Sur la Terre, le carbone (le 14ème élément chimique dans l'ordre d'abondance) n'est qu'un élément à l'état de trace, loin derrière l'oxygène et le silicium, mais il est la brique du vivant. A la surface du globe, le carbone se retrouve dans quatre réservoirs principaux : l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et le sol, et est impliqué dans des flux et des transferts dont le CO_2 est le composant central.

Le carbone est apparu sur terre suite au dégazage du manteau par l'activité volcanique puis absorbé par les océans et stocké sous la forme carbone inorganique dans des roches sédimentaires. Concernant le carbone organique dans le sous-sol, la quantité de matière organique (MO) fossile est estimée à 12 MGtC (Gobat et al., 2003) dont une partie correspond aux combustibles (charbon, pétrole, gaz). L'océan, quant à lui, est un réservoir immense de 39 000 GtC, majoritairement sous forme de CO_2 dissous (très soluble dans les eaux froides) mais aussi sous forme de matière organique et de tests carbonatés provenant des êtres vivants qui libéreront ensuite du CO_2 dissous à leur mort. Le sol est un réservoir deux à trois fois supérieur à celui de l'atmosphère (860 GtC) ou de la biosphère (450 - 650 GtC), contenant 1500 à 2400 GtC dans les 3 premiers mètres (Jobbágy and Jackson, 2000) dont 700 GtC dans les 30 premiers centimètres (Batjes, 1996).

Concernant les flux de CO_2 (1GtC = 3.664 $GtCO_2eq$), le flux de carbone annuel dans l'atmosphère est de + 4.9 GtC (+ 18 $GtCO_2$), correspondant au flux net entre les flux de carbone vers l'atmosphère, du aux émissions anthropiques annuelles de carbone fossile (9.5 GtC an^{-1} ou 35 $GtCO_2$), à la déforestation et aux changements d'usage des sols (1.5 GtC an^{-1} ou 6 $GtCO_2$), et les flux de carbone de l'atmosphère vers les autres compartiments que sont l'océan (2.5 GtC an^{-1} ou 9 $GtCO_2$) et la biosphère et le sol (3.2 GtC an^{-1} ou 12 $GtCO_2$) (Friedlingstein et al., 2019) (Figure 1.1).

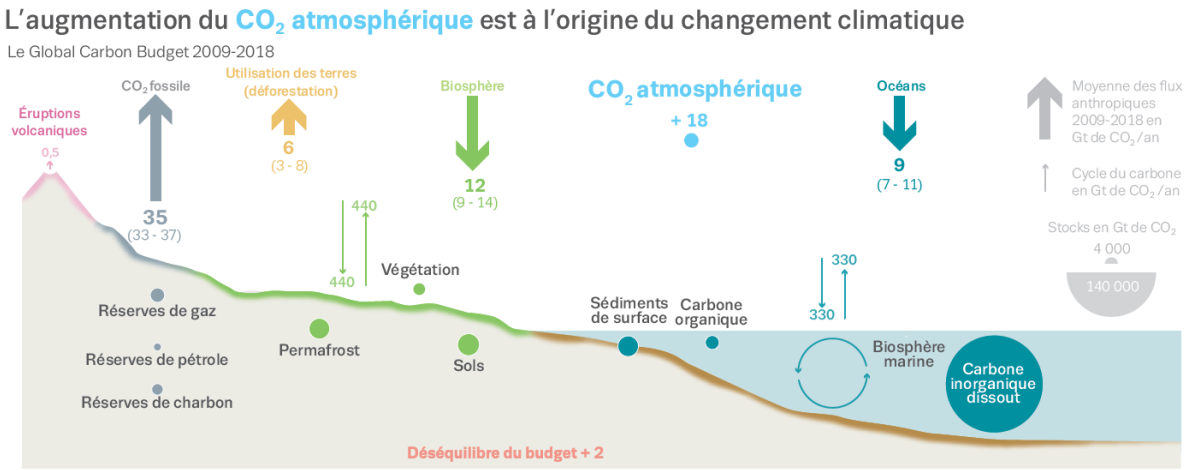


FIGURE 1.1 : RESERVOIRS ET FLUX DE CARBONE, VALEURS MOYENNES ANNUELLES POUR LA PERIODE 2009-2018, EXPRIMES EN GIGATONNES DE CARBONE ($GtCO_2$), EXTRAIT DE FRIEDLINGSTEIN ET AL. (2019)

Cependant, comptabiliser les flux de carbone ne concernent pas uniquement les flux de CO_2, mais également les flux de CH_4 et N_2O, exprimés en équivalents CO_2 sur une base de potentiel de réchauffement global (PRG). Le PRG est un indice servant à évaluer la contribution relative au réchauffement de la planète d'une émission dans l'atmosphère d'un kilogramme d'un gaz à effet de serre particulier par comparaison avec l'émission d'un kilogramme de dioxyde de carbone sur une période donnée. Les PRG du méthane (CH_4) et du protoxyde d'azote (N_2O) sont ainsi de 28 et 265 (pour une période de 100 ans par convention) d'après le cinquième rapport du GIEC (AR5). De manière globale, les émissions totales annuelles de GES d'origine anthropique, estimées à 52 ± 4.5 $GtCO_2eq\ an^{-1}$ en 2019, se répartissent à 75% (39.1 ± 3.2 $GtCO_2\ an^{-1}$) pour le CO_2, 19% (10.1 ± 3.1 $GtCO_2\ an^{-1}$) pour le méthane (CH_4) et environ 5 % (2.8 ± 0.7 $GtCO_2\ an^{-1}$) pour le protoxyde d'azote (N_2O) (IPCC, 2019) (Figure 1.2).

1.1.2 Flux de GES du secteur agricole à l'échelle de la planète

L'agriculture, la foresterie et d'autres types d'utilisation des terres (AFAT) représentent 23% des émissions totales de GES, soit 12 ± 3 $GtCO_2eq\ an^{-1}$ sur la période 2007-2016 (IPCC, 2019) et représentent 13% de CO_2, 44% de méthane et 82% de protoxyde d'azote (N_2O) des émissions totales de chacun de ces GES (Figure 1.2).

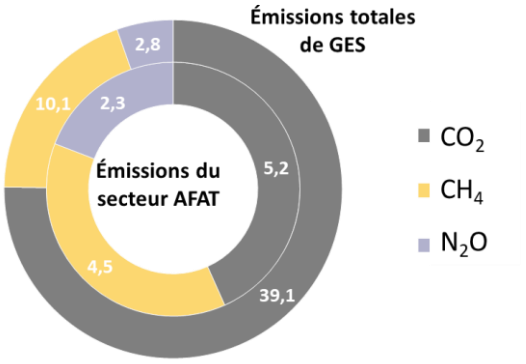


FIGURE 1.2 : REPARTITION DES EMISSIONS ANNUELLES DE GES TOTALES ET DU SECTEUR AFAT (IPCC, 2019)

Les émissions de CO_2 du secteur AFAT estimées à 5.2 ± 2.6 $GtCO_2eq\ an^{-1}$, correspondent aux flux anthropogéniques nets de CO_2 dus aux changements d'usage des terres (déforestation et afforestation) ainsi qu'aux changements de gestion des terres (IPCC, 2019). Les émissions de CH_4 (4.5 ± 1.4 $GtCO_2eq\ an^{-1}$ pour la période 2007-2016) (IPCC, 2019) proviennent de la dégradation, par des microorganismes, des molécules organiques en conditions anaérobies, par fermentation dans le sol. Les principales sources de CH_4 sont les zones humides et sol de rizières, les ruminants (fermentation entérique) et les installations de stockage de déchets (déjections animales stockées en conditions anaérobies) (Pellerin et al., 2013). Les émissions de N_2O (2.3 ± 0.7 $GtCO_2eq\ an^{-1}$ pour la période 2007-2016) (IPCC, 2019) résultent de réactions biochimiques de nitrification (transformant l'ammonium, NH_4 +, en nitrate, NO_3 -, et produisant du N_2O) favorisée en conditions aérobies, et de dénitrification (transformant le NO_3 - en N_2 et, pour partie, en N_2O) favorisée en conditions anaérobies. Les principales sources de N_2O sont les engrais azotés minéraux de synthèse, l'urée et les matières organiques non digérées contenues dans les déjections des animaux (Pellerin et al., 2013).

1.1.3 Flux de GES et sols

Dans le système « sol-plante », les émissions positives de CO_2 dans l'atmosphère par respiration sont légèrement inférieures au captage du CO_2 par la photosynthèse, faisant des terres émergées un puits de carbone. Mais les sols sont également le lieu de flux de CH_4 et de N_2O (Figure 1.3). Pour le méthane, les sols abritent à la fois des populations de bactéries méthanogènes anaérobies, responsables de la production de méthane dans les sols et des bactéries méthanotrophes aérobies, responsables de son oxydation en CO_2. Les sols inondés, comme les sols de rizières, sont sources de CH_4 , l'apport d'engrais organiques favorisant les émissions de CH_4 tandis que les sols exondés sont des puits de CH_4, la mise en culture et l'apport d'engrais ammoniacal réduisant le potentiel méthanotrophe de ces sols (Roger and LeMer, 2003). Pour le protoxyde d'azote, il est un produit de la nitrification, principalement en milieu aérobie et de la dénitrification, de manière dominante en milieu anaérobie (Nicolardot and Germon, 2008).

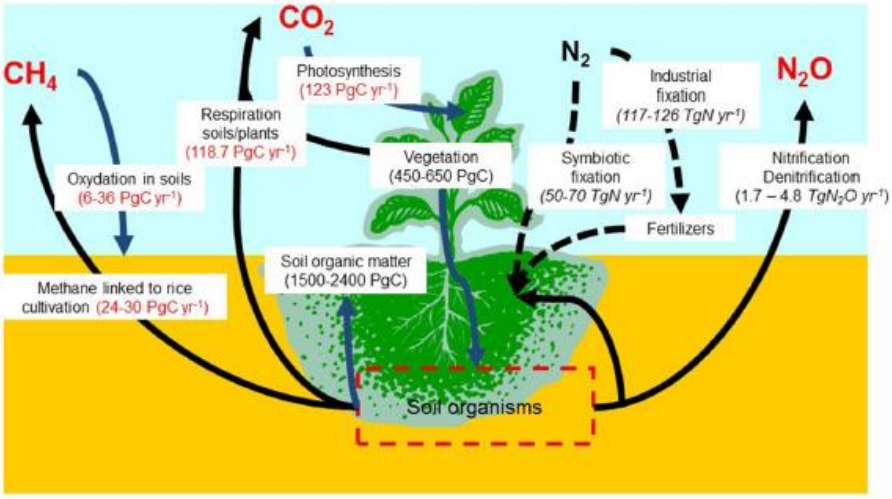


FIGURE 1.3 : SOL ET FLUX DE GES, EXTRAIT DE BISPO ET AL. (2017)

1.1.4 Emissions de CO_2 et changement d'usage des terres à l'échelle de la planète

Le bilan des émissions de CO_2 du secteur AFAT liées aux changements d'usage et de gestion des terres (5.2 ± 2.6 $GtCO_2eq\ an^{-1}$) et du puits de CO_2 que les terres émergées constituent (-11.2 ± 2.6 $GtCO_2eq\ an^{-1}$) est donc un puits de CO_2 de 6.0 ± 2.0 $GtCO_2eq\ an^{-1}$ mais la persistance de ce puits est incertaine face au changement climatique (IPCC, 2019). Dans ce contexte, les changements d'usages des terres peuvent donc avoir des changements significatifs sur les réservoirs de carbone, notamment du réservoir sol qui contient entre 1500 et 2400 GtC (5500 – 8800 $GtCO_2$), et entrainer des émissions de CO_2 ou un stockage de carbone à grande échelle. Or des modifications du stock de carbone organique du sol peuvent impacter la concentration de CO_2 dans l'atmosphère et cela sur des pas de temps de l'ordre de la décennie (Derrien et al., 2016; Eglin et al., 2010).

1.1.5 Lutter contre le changement climatique

Pour lutter contre le changement climatique, deux voies d'action sont à envisager : l'adaptation et l'atténuation au changement climatique. L'adaptation consiste à s'adapter aux impacts négatifs du changement climatique et d'en maximiser les effets bénéfiques tandis que l'atténuation du changement climatique consiste à réduire ou limiter les émissions de GES de tous les secteurs, ainsi que de protéger, voire augmenter, les puits et les réservoirs de GES.

Pour le secteur de l'agriculture, la foresterie et d'autres types d'utilisation des terres (AFAT), la voie d'atténuation principale pour stopper l'augmentation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère est la séquestration de carbone dans la biomasse végétale à travers la photosynthèse puis dans les sols par restitutions organiques, où il y aura alors stockage de carbone dans le sol. Ces deux notions sont à préciser : le stockage de carbone dans le sol est « l'augmentation du stock de carbone dans le temps » tandis que la séquestration de carbone dans le sol est le « retrait net de CO_2 de l'atmosphère résultant du transfert de son carbone dans des compartiments à temps de renouvellement lent du carbone organique du sol par comparaison à une situation où ce CO_2 serait resté dans l'atmosphère » (Pellerin et al., 2019). Le terme de stockage réfère donc aux variations de stocks de carbone organique dans le sol alors que le terme séquestration fait exclusivement référence aux flux de carbone (CO_2) entre le sol et l'atmosphère via la photosynthèse. Cependant, d'autres auteurs ne considèrent pas uniquement les flux de CO_2 mais également les flux de CH_4 et N_2O, et définissent la séquestration du carbone dans le système sol-plante comme le bilan net, exprimé en équivalent CO_2 (CO_2eq) de tous les flux de GES, à l'interface sol-plante-atmosphère du site de mesure pour un agroécosystème donné, en comparaison avec un agroécosystème de référence, et pour une période et une surface données (Blanchart and Bernoux, 2005). Dans ce manuscrit, nous utiliserons donc le terme stockage de carbone dans le sol pour les variations du stock de carbone organique dans le temps et le terme de séquestration de carbone dans le sol pour le bilan net de tous les flux de GES à l'interface sol-plante-atmosphère.

1.2 Stocker du carbone organique dans les sols agricoles

Le sol étant un important réservoir de carbone, où les terres émergées constituent un puits de carbone (Figure 1.1), l'une des voies d'atténuation pour lutter contre le changement climatique est la séquestration de carbone dans le sol, notamment à travers la photosynthèse pour les sols agricoles.

1.2.1 Le carbone organique dans le sol : source et compartiments

Dans le sol, le carbone organique est le principal constituant (environ 58 %) des matières organiques (MO) qui elles, sont constituées à 95 % de MO mortes et à 5 % d'organismes vivants (proportions indicatives et variant fortement d'un sol à l'autre, et d'un horizon à l'autre) (Figure 1.4) (Pellerin et al., 2019). En théorie, les végétaux ne sont pas les seuls producteurs de carbone organique du sol, les champignons, bactéries, algues et animaux du sol en sont également producteurs mais la végétation reste la principale source de la MO à travers leurs productions de litières (appareils végétatifs aériens et racinaires), leurs exsudats racinaires (produits organiques sécrétés) et via les associations symbiotiques mycorhiziennes et fixatrices d'azote (Derrien et al., 2016 ; Legros, 2007).

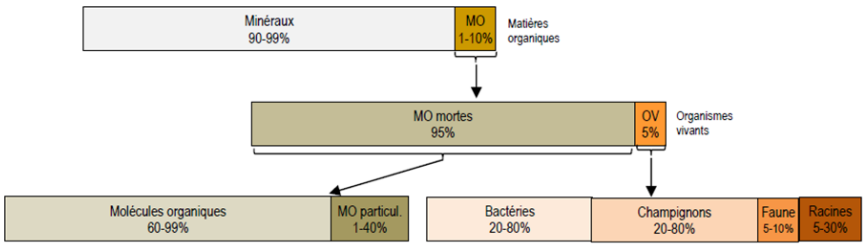


FIGURE 1.4 : MATIERES ORGANIQUES DU SOL : NATURE ET PROPORTIONS INDICATIVES, EN MASSE, (D'APRES CALVET ET AL., 2011), EXTRAIT DE PELLERIN ET AL. (2019)

De plus, on distingue trois catégories de MO dans le sol, définies suivant le temps de résidence du carbone organique dans ces compartiments (Figure 1.5). Les deux premiers compartiments sont alimentés par les apports végétaux et les résidus animaux, bactériens et fongiques. Ce sont des stocks de MO actifs et renouvelés régulièrement : *les MO labiles*, dégradées de la journée à l'année. *Les MO intermédiaires*, dégradées en quelques années ou décennies. Le troisième compartiment correspond aux *MO stables* qui elles, se renouvellent de plusieurs décennies à plusieurs siècles (Derrien et al., 2016). Ces compartiments restent cependant théoriques.

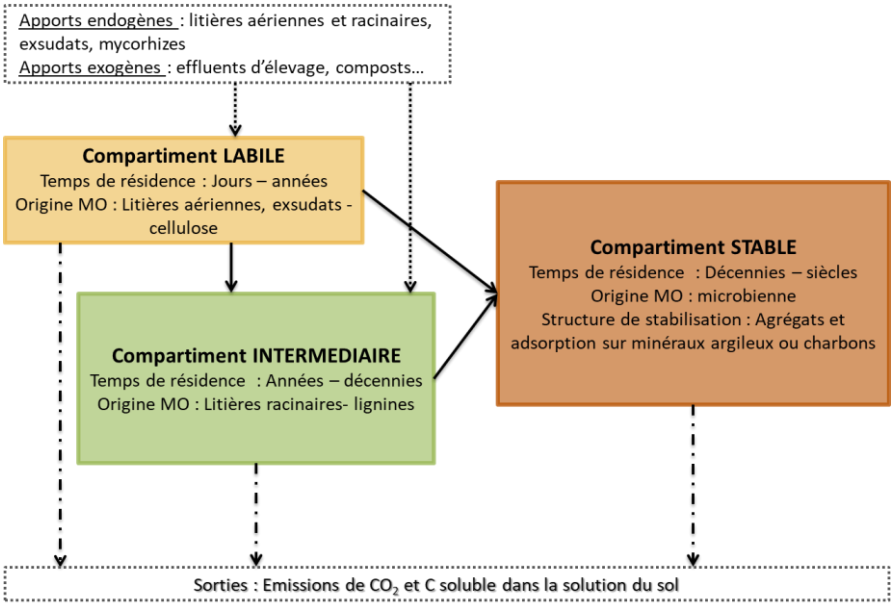


FIGURE 1.5 : COMPARTIMENTS DU CARBONE DU SOL EN FONCTION DE SON TEMPS DE RENOUVELLEMENT, ADAPTE DE DERRIEN ET AL. (2016)

Pour étudier les différentes formes de MO du sol, différents types d'analyses sont utilisées pour mesurer le carbone organique du sol des différents compartiments. Par exemple, des méthodes de séparation physique (fractionnement granulométrique ou densimétrique) peuvent permettre de séparer des fractions organiques de cinétiques différentes, la fraction grossière pouvant être assimilée à la fraction labile du carbone. Les méthodes isotopiques, basées sur les différents isotopes du carbone ($^{14}C/^{13}C/^{12}C$), permettent, quant à elle, d'étudier le temps de résidence des matières organiques dans le sol (Citeau et al., 2008).

1.2.2 Teneur et stock de carbone organique dans le sol

Par convention, la mesure analytique en laboratoire de la quantité de carbone organique présente dans le sol est exprimée par rapport à la quantité de l'échantillon de sol, on parle de teneur en teneur en carbone organique du sol (COS) exprimée en kgC kg^{-1} de sol. Dans le sol, la teneur en carbone organique (kgC kg^{-1}), décroît avec la profondeur à partir de la surface tel que l'illustre la Figure 1.6 pour des sols volcaniques hawaïens où les teneurs en carbone diminuent avec la profondeur, notamment dans les 20-30 premiers cm du profil (Torn et al., 1997).

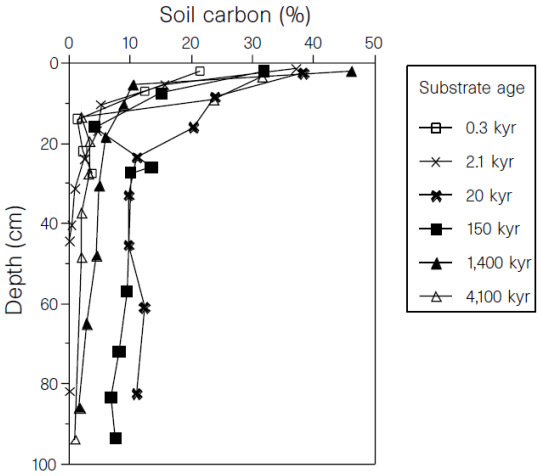


FIGURE 1.6 : TENEUR EN COS (GC POUR 100G SOL, EXPRIMEE EN %) EN FONCTION DE LA PROFONDEUR DU SOL, EXTRAIT DE TORN ET AL. (1997)

Le stock de COS se définit comme la masse de COS présente dans un volume de sol. Il peut s'exprimer sous la forme d'un taux correspondant à une masse de COS par unité de surface (exprimé en kgC m^{-2}) pour une profondeur de sol donnée, ou bien comme une masse de COS en KgC pour une surface et une profondeur données. D'un point de vue méthodologique, le stock de COS (poids par unité de surface, exprimé en kgC m^{-2}) d'un échantillon de sol est calculé à partir de la teneur en COS (teneur en carbone totale – teneur en carbone inorganique, exprimée en kgC kg^{-1} de sol), de la densité apparente (poids par unité de volume « d_{app} », exprimée en kg cm^{-3}), de la profondeur considérée (épaisseur « e » exprimée en cm) et d'un facteur de correction pour ôter la masse d'éléments grossiers (1- % éléments grossiers)/100) de la fraction fine du sol (< 2 mm).

*Stock de COS = teneur en COS * d_{app} * e * (1- taux d'éléments grossiers)*

De manière générale, les stocks de COS ont été étudiés par les agronomes pour la couche 0-30 cm, correspondant à l'horizon travaillé. Cette profondeur, recommandée par les lignes directrices de l'IPCC (IPCC, 2006) est également celle étudiée dans ce manuscrit bien que les estimations de stock de COS de l'échelle mondiale (Batjes, 2016) au site d'étude (Balesdent et al., 2017) indiquent un stock de COS quasi-équivalent pour l'horizon 0-30 cm et pour l'horizon 30-100 cm. Dans ce manuscrit, la teneur en carbone total est équivalente à la teneur en carbone organique, les sols volcaniques de La Réunion ne contenant pas de carbone inorganique. Les mesures analytiques du carbone total ont été réalisées par combustion sèche au laboratoire du CIRAD de Saint-Denis de La Réunion. Les mesures de densité apparente ont été réalisées avec la méthode des cylindres et directement à partir des carottes de sol prélevées sur le terrain. Les éléments grossiers ont été pesés pour chaque échantillon de sol issus des carottes de sol prélevées sur le terrain.

1.2.3 Atténuation du changement climatique par stockage de COS

Augmenter le stock de COS, c'est augmenter la teneur en COS à travers l'augmentation d'apports de matières organiques au sol, soit à travers la photosynthèse par la végétation soit par l'apport de matières organiques externes. Dans un agrosystème, la gestion du carbone organique est basée sur un principe simple : plus la végétation et l'apport externe de matière organique sont importants plus la quantité de MO sera importante à long terme. Augmenter les stocks de MO dans les sols nécessite donc d'augmenter les entrées de carbone dans les sols sans augmenter les flux de sorties (Figure 1.7).

Ainsi, l'augmentation des flux d'entrée correspond à l'augmentation des apports endogènes (résidus de culture laissés au sol, apports racinaires, exsudats, mycorhizes) et des apports exogènes de MO (effluents d'élevage, composts…) ainsi que du maintien d'un couvert végétal permanent tout en évitant les pertes par érosion, lessivage (C solide), par des flux de carbone dissout (lixiviation (C soluble)) et par minéralisation (CO_2), processus majeur de sortie du carbone du sol. On peut tout de même noter qu'à apport égal, le carbone d'origine racinaire contribue davantage au stockage de C que le carbone d'origine aérienne (Derrien et al., 2016; Pellerin et al., 2019).

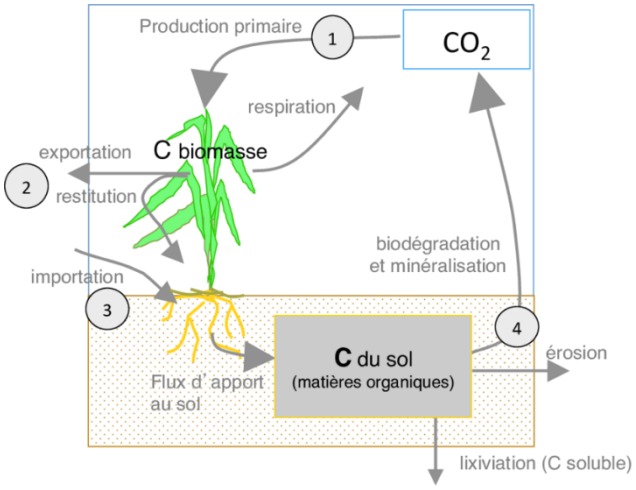


FIGURE 1.7 : LES DIFFERENTS PROCESSUS CONTROLANT LE STOCKAGE DE CARBONE DANS LES SOLS, EXTRAIT DE CHENU ET AL. (2014)

1.2.4 Adaptation au changement climatique par stockage de COS

En plus de leur rôle dans l'atténuation du changement climatique, les matières organiques ont un bénéfice local pour les agrosystèmes par leurs effets sur les propriétés du sol. Les MO ont donc des fonctions diverses dans les sols dont elles affectent les propriétés (Figure 1.8). La contribution des MO aux propriétés et fonctions des sols dépend de leur qualité, quantité, localisation et de leur dynamique mais de manière générale, la MO contribue à de nombreux services écosystémiques (amélioration de la fertilité chimique et biologique, amélioration de la qualité physique des sols, de l'eau, de l'air). Le carbone organique du sol est donc également une voie d'adaptation au changement climatique en augmentant la résilience des agrosystèmes (Pellerin et al., 2019).

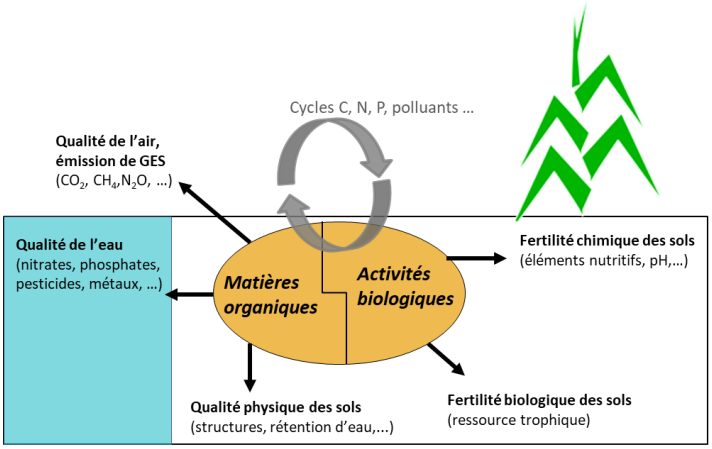


FIGURE 1.8 : LES FONCTIONS DES MATIERES ORGANIQUES DU SOL, D'APRES CHENU (2016)

1.2.5 Dynamique de stockage de carbone organique dans le sol

La majeure partie des apports de MO au sol est minéralisée et transformée en produits microbiens de quelques jours, mois à quelques années. Ces produits de transformation (10 à 20 % du C apporté) seront ensuite protégés de la décomposition et minéralisés très lentement, en plusieurs dizaines d'années (Pellerin et al., 2019). Augmenter le stock de carbone organique du sol (COS) signifie donc principalement augmenter le COS du compartiment « stable » du sol, qui se renouvelle à l'échelle de plusieurs décennies à plusieurs siècles, celui-ci étant alimenté par les deux compartiments alimentés par les apports végétaux et les résidus animaux, bactériens et fongiques : le compartiment « labile » (MO dégradées de la journée à l'année) et le compartiment « intermédiaire » (MO dégradées en quelques années ou décennies). Le compartiment « stable » comprend la majorité du carbone organique stocké dans les sols, ce carbone étant inclus dans des agrégats et/ou adsorbé sur les surfaces minérales (Derrien et al., 2016). Cependant, la fraction labile du COS est essentielle pour la fertilité, la structure et la biodiversité du sol, l'augmentation des stocks des formes labiles et stables du COS est donc désirable (Chenu et al., 2019). Le stock de COS que l'on mesure à un instant t est donc composé de la somme des restes de tous ces apports annuels du passé. Balesdent et al., 2018 ont démontré qu'environ 70 % des apports de carbone organique au sol durant 50 ans (1965-2015) se retrouvent dans les 30 premiers centimètres du sol contre 30 % dans l'horizon 30-100 cm pour les sols cultivés.

1.2.6 Processus de stabilisation du carbone organique dans le sol

Si le carbone « stable » était considéré comme constitué de matières organiques récalcitrantes à la décomposition (molécules résistantes à une attaque chimique et démontrées aujourd'hui comme non persistantes dans le sol) et de substances humiques (molécules non existantes *in situ* mais réarrangées lors de leur extraction au laboratoire) selon le modèle historique d'humidification. Aujourd'hui, les mécanismes de stabilisation des matières organiques sont considérés comme dépendants de facteurs biologiques et environnementaux (Figure 1.9) (Lehmann and Kleber, 2015; Pellerin et al., 2019; Schmidt, 2012).

Selon le nouveau concept de la matière organique du sol, les matières organiques incorporées dans le sol subissent des réactions de biotransformations (Figure 1.9) qui sont des réactions chimiques catalysées par des enzymes produites par des organismes vivants du sol, en particulier les microorganismes. La macro-faune (vers de terre, …) a une action mécanique (fragmentation, incorporation, bioturbation) et une action biochimique. La méso- et micro-faune semblent avoir principalement un rôle de prédation sur les microorganismes, qui eux sont responsables de réactions biochimiques qui décomposent la matière organique. La matière organique est donc un continuum de dégradation de composés organiques depuis les matières organiques particulaires jusqu'aux briques élémentaires du vivant (Pellerin et al., 2019). Les composés les plus aptes à être protégés des dégradations ultérieures, et en particulier de la minéralisation, sont les molécules les plus simples et dont le contenu en énergie est faible, qui peuvent former des assemblages avec d'autres composés organiques (structures supramoléculaires) ou avec des minéraux. Au final, les produits issus micro-organismes sont la principale source des composés organiques stabilisés à long terme par rapport aux végétaux (Pellerin et al., 2019).

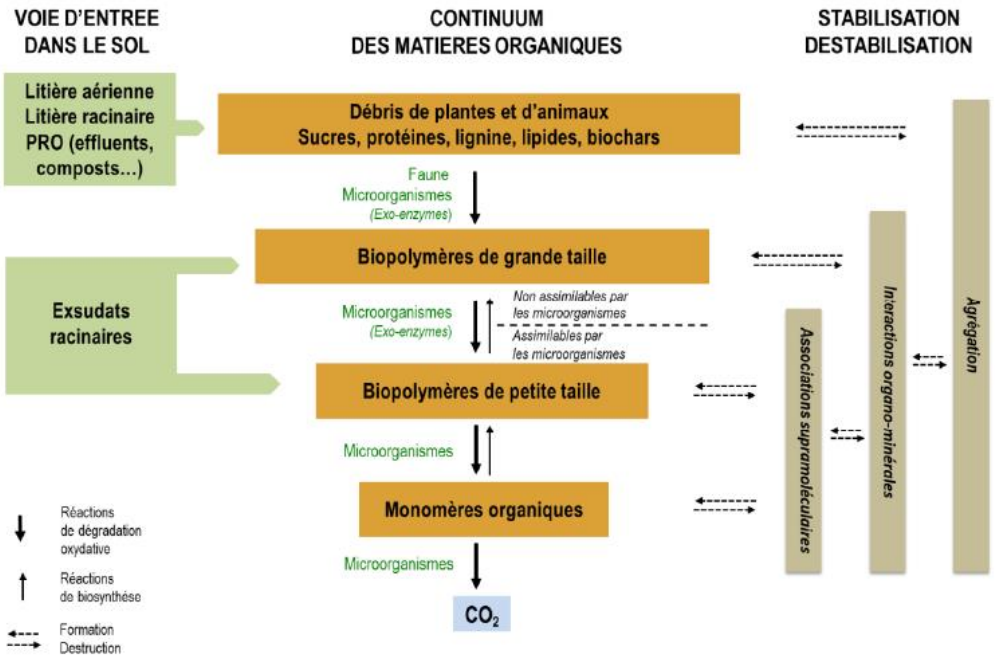


FIGURE 1.9 : CHAINES DE BIOTRANSFORMATIONS DES MATIERES ORGANIQUES DANS LE SOL (D'APRES LEHMANN AND KLEBER, 2015), EXTRAIT DE PELLERIN ET AL. (2019)

1.2.6.1 Facteurs biotiques de stabilisation du carbone organique dans le sol

Le stockage ou le déstockage de C dans le sol dépend de mécanismes biotiques (plantes, faune, micro-organismes) et abiotiques au sein de la structure même du sol (Derrien et al., 2016).

Si certaines matières organiques peuvent être **récalcitrantes** à la décomposition, c'est-à-dire que leur composition chimique diminue leur vitesse de dégradation sur un pas de temps allant de l'année à la décennie (compartiment intermédiaire), plusieurs travaux ont montré que cette résistance chimique n'influençait pas la stabilisation du carbone de ces molécules à long terme, excepté certains charbons. La persistance du C dans les sols au-delà de la décennie ne serait donc pas due à la composition des MO (composition chimique et récalcitrance) mais aux conditions du milieu (localisation, conditions de l'environnement).

La végétation contribue également à la stabilisation des MO du sol par leur effet sur la structure physique du sol soit par effet protecteur soit par la formation d'agrégats stables (MO protégées de la dégradation) entre racines fines et associations mycorhiziennes. De manière globale, les plantes semblent avoir un effet positif sur le maintien des MO dans le sol dans les 3 compartiments (labiles, intermédiaire et stable) mais certains mécanismes favorisent au contraire la déstabilisation des MO tels que le « priming effect » (sur-minéralisation suite à des apports de MO fraiche). Les effets relatifs de ces processus restent donc incertains quant à la stabilisation ou la déstabilisation des MO dans les sols.

Pour **la faune du sol**, si elle fragmente et mélange les MO (dans le tractus intestinal), ce qui a pour effet d'accélérer la biodégradation des végétaux, ils stabilisent également les MO par la formation de bio-structures (galeries, turricules, …) favorisant la formation d'interactions organo-minérales qui protègent à leur tour les MO des micro-organismes eux-mêmes. Cependant, là encore, la balance entre stabilisation et déstabilisation des MO, stockage et déstockage de carbone due aux organismes du sol (structures biogéniques de la macrofaune, interactions entre organismes du sol, diversité microbienne) est incertaine (Derrien et al., 2016).

1.2.6.2 Facteurs abiotiques de stabilisation du carbone organique dans le sol

La stabilisation des MO par les mécanismes abiotiques correspond aux mécanismes affectant la structure physique du sol. Or, la structure du sol correspond à l'agencement des particules solides (minérales et organiques) et des pores dans lesquels circulent les fluides, les décomposeurs et les composés solubles (Derrien et al., 2016).

Dans le sol, les particules élémentaires du sol (sable, limon, argile), les particules de MO et les substances dérivées des exsudats des racines et de l'activité microbienne sont liées entre elles : ce sont des agrégats (Mathieu and Lozet, 2011) ; or ces **agrégats protègent la MO de la minéralisation** (Johan Six et al., 2002). Le temps de résidence du C dans les débris végétaux est plus grand s'ils sont inclus dans des agrégats plutôt que libres et que le temps de résidence du C dans les micro-agrégats (< 50 µm) était supérieur à celui des macro-agrégats (> 50 µm). Si les micro-agrégats sont utilisés comme des indicateurs du degré de protection physique du carbone, les vitesses de minéralisation sont également impactées par la nature des MO de ces agrégats et par la durée de vie de ces mêmes agrégats. La durée de piégeage des MO varie donc en fonction de tous ces facteurs. Mais la minéralisation nécessite également un contact entre la MO et les microorganismes, le tout dans des conditions environnementales favorables à l'activité microbienne (Derrien et al., 2016).

Cependant, la **stabilisation physico-chimique par adsorption des MO par les minéraux** au sein de complexes organo-minéraux est également un facteur clé de la stabilisation des MO dans le sol (Barré et al., 2014). La fraction du C adsorbée sur les argiles représenterait donc une part relativement importante du carbone organique du sol stabilisé pour des siècles ou des millénaires dans le sol. Une méta-analyse sur des données de ^{14}C sur différents profils de sol a montré que le carbone stabilisé en profondeur dépendait du type de sol et donc des phases minérales (teneur et type d'argiles) qui le composent. En effet, plus la profondeur augmente, plus le carbone est âgé et cela diffère en fonction du type de sol (Mathieu et al., 2015). Les minéraux argileux (< 2 µm) mais aussi certains alumino-silicates mal cristallisés (allophanes, imogolites des andosols) ou des oxy-hydroxydes de fer (Fe) et d'aluminium (Al), protègent efficacement la MO de la dégradation en l'adsorbant ou en la piégeant au sein d'agrégats infra-micrométrique. Cette matière organique est ainsi soustraite à l'action des micro-organismes du sol (Derrien et al., 2016). D'autre part, les molécules adsorbées ne le sont pas de manière uniforme sur toute la surface minérale mais sur de petites zones dispersées sur le minéral (Remusat et al., 2012). Vogel et al. (2014) ont également montré que les MO nouvellement adsorbées le sont sur les surfaces où de la MO est déjà adsorbée et non sur des surfaces libres.

Dans le cas des Andosols, les formes minérales mal-cristallisées (oxy-hydroxydes métalliques (Fe, Al), proto-imogolites, allophanes) sont très efficaces pour stabiliser la MO au sein des nano-complexes organo-minéraux (Basile-Doelsch et al., 2005a; Torn et al., 1997) qui stabilisent le carbone organique pour des durées pouvant aller jusqu'à plusieurs milliers d'années tout en bloquant la croissance cristalline des formes minérales mal-cristallisées (Levard et al., 2012). D'autre part, la stabilisation du carbone dans les Andosols serait également liée à la présence de carbone organique stabilisé dans les mesopores (2-50nm) formés par la structure fractale des agrégats d'allophanes (« nano-labyrinthe » (5-100nm)), ce qui rendrait inaccessible le COS aux enzymes et micro-organismes (Chevallier et al., 2010). De cette interaction organo-minérale où la stabilisation du COS serait lié à la protection physique et physico-chimique par les phases minérales (< 20 µm) est issu le concept de saturation qui voudrait que les surfaces minérales puissent accueillir une quantité limitée de carbone et que le stockage de COS soit ainsi borné (Pellerin et al., 2019).

1.3 Limiter les émissions de GES dues aux changements d'usage des terres

Le sol est un important réservoir de carbone où le stock de COS dans les horizons de surface dépend du climat et des usages (Mathieu et al., 2015). Or à l'échelle mondiale, les changements d'usages des terres constituent effectivement une source de carbone (Figure 1.1). L'une des voies d'atténuation pour lutter contre le changement climatique est donc de limiter les pertes de COS et les émissions de GES dues aux changements d'usages des terres.

1.3.1 Changements d'usage des terres

Les émissions de carbone dues aux changements d'usages à l'échelle mondiale, estimées à 1.1 ± 0.5 GtC pour la période 1990-2010 (Houghton et al., 2012), et à 1.5 ± 0.5 GtC pour la période 2007-2018 (Le Quéré et al., 2018), sont en augmentation et correspondent, depuis les années 1990, aux émissions de carbone dues aux changements d'usages dans les tropiques (Houghton, 2013). Une meta-analyse sur 385 publications en contexte tropical a montré des variations importantes des stocks de COS, globalement de -30 à + 50 % pour une profondeur moyenne des sols de 32 cm, en fonction des changements d'usages (Figure 1.10). Pour les changements d'usages des terres strictement agricoles (hors forêts), la conversion de prairies en cultures entraine une perte de stock de COS (-10.4 ± 6.1 %) alors que la conversion de cultures en prairie ou jachère entraine une augmentation de stock de COS, de 25.7(±11.1) % et 32.2(±16.1) %, respectivement (Don et al., 2011).

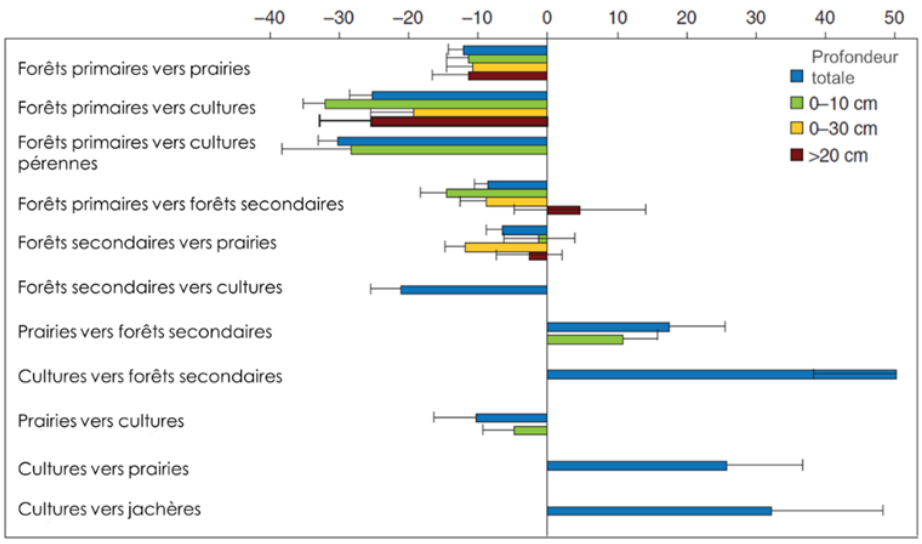


FIGURE 1.10 : VARIATIONS DES STOCKS DE COS (%) POUR DIFFERENTS TYPES DE CHANGEMENTS D'USAGES DANS LES TROPIQUES, ADAPTE DE DON ET AL. (2011)

Cependant, Powers et al., 2011 recommandent une extrême prudence quant à la généralisation des variations moyennes de stocks de COS selon des changements d'usages pour des régions n'ayant pas les mêmes conditions biophysiques car les déterminants physiques telles la pluviosité et/ou la minéralogie peuvent impacter fortement les effets des changements d'usages sur les variations de stocks de COS.

1.3.2 Potentiel de stockage du carbone dans le sol

Pour évaluer les différences de stocks de COS entre différents usages ou différentes pratiques, les mesures du stock de COS doivent être réalisées sur des pas de temps longs afin de pouvoir mesurer les évolutions de stock de COS. Or, les expérimentations sur plusieurs décennies (approche diachronique par des mesures dans le temps long) pour mesurer l'impact de changements d'usages ou de pratiques sur les stocks de COS restent rares. La problématique est donc de mesurer un potentiel de stockage (ou de déstockage) de COS sur des pas de temps longs (généralement supérieurs à la décennie) pour des changements d'usages (ou de pratiques) pour des conditions biophysiques similaires. Une approche synchronique (mesures simultanées à un instant t) de mesure de stock de COS pour différents usages (ou pratiques) dans des conditions biophysiques similaires permet ainsi d'accéder à ce potentiel de stockage.

Le potentiel de stockage de COS est défini comme le gain maximum du stock de COS atteignable sous un climat, un type de sol et un temps (20 ans pour atteindre un nouvel équilibre selon le GIEC) donnés (Chenu et al., 2019).

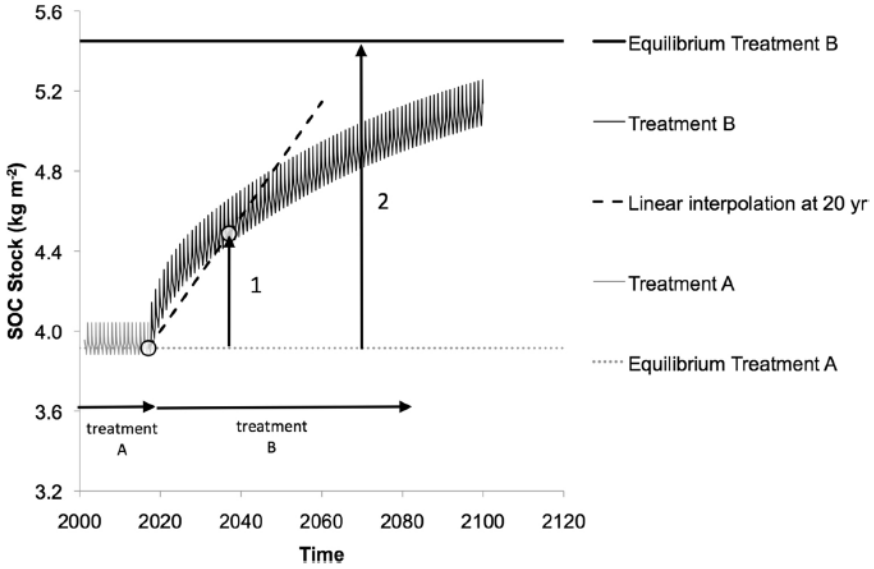


FIGURE 1.11 : DYNAMIQUE D'AUGMENTATION DU STOCK DE COS SUIVANT UN CHANGEMENT D'USAGE OU DE PRATIQUES AGRICOLES (AUGMENTATION DES ENTREES OU DIMINUTION DES SORTIES DE CARBONE ORGANIQUE), EXTRAIT DE CHENU ET AL. (2019)

Pour évaluer le potentiel de stockage de COS selon différents modes d'usage, l'approche généralement utilisée est celle des Tiers, développée par le GIEC. L'estimation de la différence entre deux états d'équilibre (1 et 2) (Figure 1.11) peut être réalisée à partir de valeurs de stocks de COS par défaut, avec des facteurs Tier 1 (à l'échelle de grandes régions) ou Tier 2 (à l'échelle de pays ou de régions) tandis que l'approche Tier 3 est basée sur des modèles et des systèmes de mesures détaillés (Chenu et al., 2019). Cependant, l'une des limites fondamentales, pour un sol donné, est de savoir si l'état d'équilibre est atteint, faisant de la quantification du potentiel de stockage, entre un état d'équilibre 1 à un état d'équilibre 2 et de la trajectoire entre ces deux états une question de recherche majeure.

1.4 Recherche et gouvernance sur la séquestration du carbone dans le sol

1.4.1 La recherche scientifique sur la séquestration du carbone dans le sol

La séquestration du carbone dans les sols, notamment agricoles, est un enjeu majeur comme voie d'atténuation et d'adaptation au changement climatique et les différentes problématiques que ce sujet soulève fait l'objet de nombreux travaux de recherche, comme le montre une étude publiée en 2018 (Smith et al., 2018) qui retrace l'historique des recherches sur la matière organique des sols. Le nombre de publications sur la séquestration du carbone des sols agricoles a augmenté de manière très importante à partir des années 1990 (Figure 1.12) et les domaines qui remportent le plus grand nombre de publications sur le sujet entre 1990 et 2016 sont les domaines des sciences du sol, des sciences de l'environnement et des sciences agronomiques.

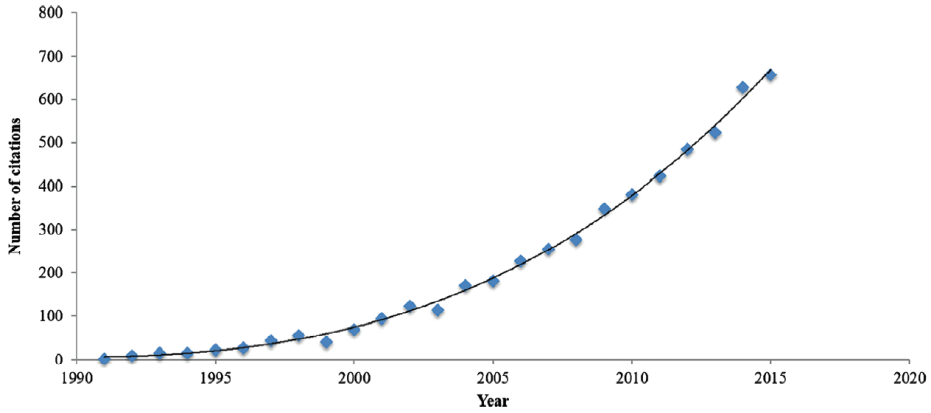


FIGURE 1.12 : NOMBRE DE PUBLICATION SUR LA SEQUESTRATION DU CARBONE DES SOLS AGRICOLES ENTRE 1990 ET 2016, EXTRAIT DE SMITH ET AL. (2018)

Si les premiers travaux sur la matière organique du sol étaient liés à la fertilité des sols, la recherche sur la matière organique du sol sur la décennie 2006-2016 est principalement associée aux termes 'qualité du sol' et au 'climat', pour 19% et 14% des publications, traduisant probablement une prise en compte du carbone organique du sol dans le cycle global du carbone. En effet, l'occurrence du terme 'carbone' dans les publications sur la matière organique du sol est passée de moins de 9% de 1957 à 1986 jusqu'à plus de 51% sur la période 2007-2016. En 2016, les groupes de mots-clés les plus nombreux répertoriés dans les publications sur la séquestration du carbone des sols agricoles étaient séquestration, gestion, matière, changement climatique, séquestration carbone, matière organique et stockage d'azote.

1.4.2 Gouvernance sur la séquestration du carbone du sol

En termes de gouvernance, l'année 2015, année internationale des sols, a été une année charnière où l'agenda politique semble s'être emparé du sujet de la séquestration du carbone dans les sols agricoles, avec notamment la définition des Objectifs de Développement Durable (ODD) et l'initiative '4p1000' lancée à la COP21, et des déclinaisons au niveau national et régional, notamment en France.

1.4.2.1 Gouvernance internationale des Nations Unies

Le premier rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été rédigé en 1990 et a servi de base à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) établie en 1992. La CCNUCC est une « Convention de Rio », l'une des trois adoptées lors du « Sommet de la Terre de Rio » en 1992. Ses conventions sœurs sont la Convention sur la diversité biologique (CDB) et la Convention sur la lutte contre la désertification (CLD), les trois étant intrinsèquement liées. En 1997, le Protocole de Kyoto a été le premier texte international à reconnaitre la responsabilité des pays, notamment des pays développés, pour les émissions de GES dans l'atmosphère et à avoir une portée juridique visant à limiter les impacts anthropiques dangereux des émissions de GES sur le climat.

En 2015, dans le cadre de la CCNUCC, les négociations internationales sur le climat ont abouti à l'adoption de l'Accord de Paris durant la COP21 et dont la mise en œuvre est prévue à partir de 2020. Il fixe un objectif global de réduction d'émissions visant à contenir le réchauffement climatique en dessous de 2°C, et si possible de viser à poursuivre les efforts pour limiter l'élévation des températures à 1,5 °C. L'accord de Paris de 2015 mentionne, dans son article 4, l'objectif d'atteindre la neutralité carbone (équilibre entre les émissions de GES et absorptions grâce aux puits naturels et technologiques) avant la fin du siècle, pour rester bien en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels. Le rapport du GIEC de 2018 intitulé « Global warming of 1.5°C » (IPCC, 2018) établit, lui, que pour contenir la hausse de la température en deçà de +1,5°C par rapport à la période préindustrielle, il serait nécessaire d'atteindre la neutralité carbone à l'échelle du globe en 2050.

La « neutralité carbone », suppose donc de « réduire drastiquement les émissions de CO_2 liées à l'usage des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), à la déforestation et à la disparition des zones humides, ainsi que les émissions des autres GES (CH_4 et N_2O), d'origine majoritairement agricole et d'accroître simultanément le puits de CO_2 que constitue la biosphère continentale, par des changements d'occupation des sols (afforestation notamment) et le développement de pratiques agricoles et sylvicoles favorisant la séquestration de carbone dans les sols et dans la biomasse ligneuse » (Pellerin et al., 2019). Or, l'analyse des tendances récentes d'évolution des émissions de GES dans le monde montre qu'en dépit de l'accord de Paris de 2015, celles-ci ont continué d'augmenter (Le Quéré et al., 2018).

Dans le cadre de la convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD ou UNCCD en anglais), le carbone organique du sol est un des trois indicateurs de la neutralité en matière de dégradation (NDT) des terres, réalisée si toute nouvelle dégradation est compensée par l'inversion de la dégradation ailleurs, dans le même type de terre, par la restauration ou la réhabilitation. Cependant, la mesure et le suivi du COS à grande échelle est un réel défi en raison de sa variabilité. Un fort besoin d'orientations claires et de méthodes harmonisées pour estimer, cartographier et surveiller le stock de carbone organique du sol est nécessaire (Chotte et al., 2019).

L'année 2015, année internationale des sols, a également vu l'élaboration d'un programme de développement durable à l'horizon 2030 (Agenda 2030) avec la définition de 17 Objectifs de Développement Durable des Nations Unies (ODD ou SDG en anglais) qui font de l'agriculture et du climat une question prioritaire notamment en termes d'adaptation et dont le sol est un élément clé pour la réalisation de nombreux ODD (Keesstra et al., 2016).

1.4.2.2 Une initiative internationale portée par la France : l'Initiative '4p1000'

En France, l'année 2015 a été marquée par le lancement d'une initiative internationale : l'Initiative « 4 pour 1000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat », qui a été lancée lors de la COP 21 à Paris, avec pour objectif d'accroître la sécurité alimentaire, d'atténuer le changement climatique et de s'y adapter grâce à la séquestration de carbone dans les sols agricoles et forestiers, en se fondant sur les résultats de la recherche scientifique. Sur la base du ratio entre les émissions anthropiques annuelles de carbone et le stock de carbone des sols (4 ‰), l'initiative 4p1000 suggère qu'une augmentation, même relativement faible (0.4 %) des stocks de COS pourrait compenser les émissions anthropiques de CO_2 dans l'atmosphère (Soussana et al., 2017). Les changements d'usage des terres et les pratiques agricoles peuvent également jouer un rôle significatif dans l'atténuation du changement climatique en augmentant l'ampleur et la durée du stockage du carbone organique dans le sol tandis que la matière organique joue un rôle important dans la fertilité du sol et sa résilience. L'augmentation des stocks de COS est donc à la fois une voie d'atténuation et d'adaptation au changement climatique (Arrouays and Horn, 2019). L'initiative « 4p1000 » sous-tend plusieurs Objectifs de Développement Durable (ODD), notamment ceux liés aux sols et plus particulièrement à la séquestration du carbone dans le sol (Figure 1.13) : ODD n°2 « Eliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable » : les sols doivent être capables de produire une nourriture saine et de qualité, la matière organique étant un pilier fondamental de la fertilité des sols ; ODD n°13 « Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions » : la séquestration du carbone dans le sol est une solution d'atténuation du changement climatique et doit rendre les écosystèmes plus résilients au changement climatique ; ODD n°15 « Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable, gérer durablement les forêts, lutter contre la désertification, enrayer et inverser le processus de dégradation des sols et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité » : la préservation des sols est nécessaire pour le stockage du carbone dans le sol à travers la photosynthèse.

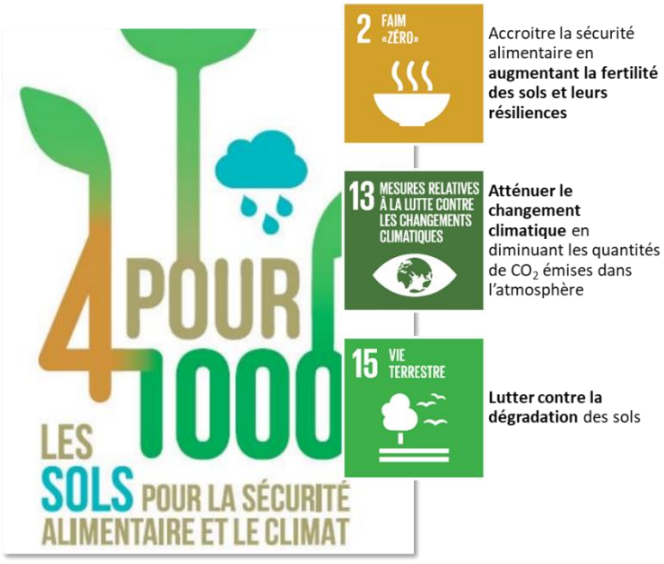


FIGURE 1.13 : INITIATIVE 4P1000 ET ODD LIES A LA SEQUESTRATION DU CARBONE DANS LE SOL

Cependant, l'augmentation de 0.4% des stocks de COS par an est un objectif ambitieux et cette initiative est fortement controversée (Kon Kam King et al., 2018). Les critiques, résumées dans l'article

de Rumpel et al. (2019) sont de plusieurs ordres. Tout d'abord, bien que le calcul du 4p1000 trouve son origine dans les travaux de Balesdent and Arrouays (1999) qui écrivaient « à titre d'illustration, une augmentation annuelle de ce réservoir [sol : 1550 GtC] de seulement de 0.4% par an stockerait autant de carbone que la combustion de carbone fossile n'en émet. [environ 6GtC dans les années 1990 (Le Quéré et al., 2018)] », sa logique, a été critiquée. En effet, ce mode de calcul ainsi que d'autres, cités par certains auteurs (Minasny et al., 2017) ont été critiqués en raison de la profondeur de sol prise en compte (de 30 cm à 2 m) (de Vries, 2018; VandenBygaart, 2018) et de la valeur des émissions (totales ou nettes) de CO_2 (et non de CH_4 et N_2O) dans l'atmosphère considérées (Baveye et al., 2018; de Vries, 2018).

D'autre part, plusieurs limites biophysiques du stockage ont été soulignées. Certaines critiques souligne le fait que le stockage de COS est limité dans le temps (Baveye et al., 2018; Schiefer et al., 2018; White et al., 2018), réversible (Baveye et al., 2018; Poulton et al., 2018), puisqu'une fois le nouvel état d'équilibre atteint, soit le stock de COS est maintenu soit il peut diminuer si les pratiques stockantes ne sont pas maintenues, ou encore surestimé en raison d'un taux de séquestration (0.4%) estimé trop élevé (de Vries, 2018; White et al., 2018), de surfaces où l'initiative serait applicables surestimées (de Vries, 2018; White et al., 2018). D'autres critiques concernent, quant à elles, l'insuffisance de biomasse disponible (Poulton et al., 2018) ou de nutriments (Baveye et al., 2018; de Vries, 2018; van Groenigen et al., 2017; White et al., 2018) pour augmenter les stocks de COS.

Des besoins sont également mis en évidence , comptabiliser les émissions de CO_2 dû au « *priming effec »t* (Baveye et al., 2018), au carbone inorganique (Baveye et al., 2018) et aussi les émissions de GES autre que le CO_2 (CH_4 et N_2O) (Baveye et al., 2018; White et al., 2018), et prendre en compte l'influence du changement climatique (hausse des températures) (Baveye et al., 2018). Les besoins en systèmes de mesure efficaces sont également soulignés par White et al., 2018.

Enfin, il existe des limites d'ordre socio-économique, notamment pour les agricultures qui pourraient y voir des barrières économiques et sociales à l'adoption des pratiques (Baveye et al., 2018; Poulton et al., 2018; White et al., 2018) ainsi que des limites politiques : White et al. (2018) voit dans le chiffre très faible de 0.004 un alibi pour l'inaction face aux émissions de carbone fossile tandis que Baveye et al. (2018) s'inquiète de la crédibilité des chercheurs en science du sol en raison d'un discours trop simpliste alors que de nombreux mécanismes restent inconnus ou non quantifiés et qui pourrait par conséquent ne pas être à la hauteur des espoirs suscités par un tel discours.

Afin de combler le manque de connaissances nécessaires à la mise en œuvre de pratiques permettant d'augmenter les stocks de carbone organique des sols tout en garantissant la sécurité alimentaire, le Comité scientifique et Technique de l'Initiative propose des priorités de recherche et de coopération scientifique internationales afin de mieux quantifier le potentiel de séquestration et de réduire les incertitudes associées. Les priorités de recherche sont focalisées sur les sols agricoles et sont regroupées en quatre piliers : 1) estimation du potentiel de stockage de COS ; 2) Développer des pratiques de gestion ; 3) Définir un environnement favorable et 4) Surveillance, rapportage et vérification. Ce travail s'inscrit dans le 1er et 4ème pilier de recherche. Les objectifs du premier pilier de recherche sont « d'améliorer les estimations du potentiel de stockage, de séquestration, voire de perte de carbone organique des sols en réponse aux modes de gestion à différentes échelles spatiales et temporelles. Ceci prendra également en compte les effets d'un stockage accru du COS à différentes échelles, y compris les co-bénéfices en termes de rendement et d'adaptation au changement climatique ». Plusieurs priorités de recherche sont en lien avec les travaux présentés dans ce manuscrit : Cartographie des stocks de carbone organique du sol (COS) et de leurs taux de changement ; Évaluation, prédiction et cartographie du potentiel de séquestration du COS dans divers

scénarios de gestion et de changement climatiques. Estimation des limites de stockage et de séquestration du COS, Vulnérabilité des stocks de COS et persistance du COS selon le type de sol, les conditions pédoclimatiques et les changements climatiques, Quantification et prédiction des autres émissions de gaz à effet de serre (CH_4, N_2O). Les objectifs du 4ème pilier de recherche sont de « fournir des métriques, des méthodologies et des outils pour la surveillance, le rapportage et la vérification (MRV) des actions visant à augmenter la séquestration du carbone organique du sol et des bénéfices associés à différentes échelles spatiales ». Plusieurs priorités de recherche sont en lien avec les travaux présentés dans ce manuscrit : élaborer des critères et des indicateurs pour guider la mise en œuvre des projets dans le plan d'action du 4 pour 1000 ; développer et améliorer les méthodes directes et indirectes de suivi et de modélisation des changements des stocks de COS et des émissions de GES, y compris les méthodologies combinant des données issues de systèmes d'information géographiques, des pratiques de gestion et des options d'utilisation des sols sur les inventaires des stocks.

1.4.2.3 Gouvernance à l'échelle nationale

Pour atteindre ses ambitions, l'accord de Paris de 2015 permet une flexibilité aux Parties en leur laissant déterminer elles-mêmes leurs engagements climatiques, sous la forme de contributions déterminées au niveau national (CDN ou NDC pour « Nationally Determined Contributions » en anglais) à renouveler tous les 5 ans. Au niveau national, les pays établissent donc des rapports de données sur leurs émissions et absorptions de GES issues de tous les secteurs à travers des inventaires nationaux de GES, soumis à la Convention-cadre et aux lignes directrices techniques élaborées par le GIEC, et proposent des scénarios pour une politique nationale d'atténuation. D'après un rapport de la FAO (2016), 89 % des 189 pays qui avaient soumis des NDCs au 26 Juillet 2016 ont inscrit l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et foresterie parmi les secteurs visés par leurs contributions pour l'atténuation et/ou l'adaptation.

Pour le secteur AFAT, les autres activités d'usage des terres hors foresterie n'ont été incluses que très récemment dans les politiques internationales et nationales d'atténuation et d'adaptation (action commune de Koronivia pour l'agriculture). Cela s'explique notamment par des difficultés d'ordre méthodologique (inventaire, compilation et mise à jour régulière des statistiques nationales pour l'agriculture, la foresterie et l'utilisation des terres) pour la préparation des estimations nationales de GES (Blanfort and Demenois, 2019).

En France, dans le cadre du projet de loi relatif à l'énergie et au climat de 2019, l'objectif de division par quatre des émissions de GES entre 1990 et 2050 (« facteur 4 ») est remplacé par un objectif de neutralité carbone en 2050, qui suppose une division des émissions par un facteur supérieur à six. Parallèlement, la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) mise en place en 2015 a fixé trois premiers budgets Carbone jusqu'en 2028, constituant des plafonds d'émissions par secteur d'activité à ne pas dépasser par période de cinq ans. Cependant, le bilan de la SNBC établi sur la période 2015-2018 révèle que le premier objectif n'a pas été atteint (Pellerin et al., 2019).

1.4.2.4 Gouvernance à l'échelle territoriale

La prise en compte du potentiel du carbone des sols en matière d'atténuation (ou d'aggravation) des changements climatiques a également, depuis 2015, une déclinaison locale : le PCAET (Plan Climat Air Energie Territorial). Dans le cadre de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015, l'élaboration des PCAET a été confiée aux établissements publics français de coopération intercommunale à fiscalité propre (EPCI) comptant plus de 20 000 habitants. Les PCAET

sont des outils pour décliner la Stratégie Nationale Bas Carbone et ont pour objectif de réduire les émissions de GES du territoire (atténuation) et d'adapter le territoire aux effets du changement climatique (adaptation). Le diagnostic territorial est le fondement de la mise en place du PCAET et doit comprendre notamment une estimation de la séquestration nette de CO2 (séquestration forestière directe, émissions associées aux changements d'affectation des sols, séquestration de carbone dans les produits bois) et de son potentiel de développement (Chabanel and Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France), 2016).

Cette prise en compte pose des questions d'ordre scientifique, car l'évaluation précise des stocks de COS et leur suivi dans le temps demeurent un véritable défi, même au niveau local. Pour l'instant, les méthodes d'évaluation du COS dans les PCAET ne peuvent s'appuyer que sur des facteurs globaux déterminés à l'échelle nationale par type d'usage des terres, voire par catégorie de pratiques agronomiques. Or, cette méthodologie (équivalente à une approche Tier 1) est peu précise, car elle ne prend pas en compte les déterminants pédoclimatiques locaux qui influencent la séquestration du COS dans les sols (Lutfalla et al., 2018).

1.5 Mesure, Rapport et Vérification (MRV)

Dans le cadre de la CCNUCC, les pays sont tenus de fournir des inventaires nationaux des émissions anthropiques (sources et puits) de tous les GES. Les systèmes de déclaration sont appelés systèmes de mesure, de rapport et de vérification (MRV). La mesure (M) fait référence aux variations des stocks de COS et des émissions de GES. Le rapport (R) fait référence à l'analyse et la compilation des données mesurées au travers de divers rapports. La vérification (V) fait référence au contrôle indépendant de l'information rapportée et des méthodes utilisées pour générer l'information. Les données collectées doivent être transparentes, complètes, cohérentes, comparables et précises (FAO, 2017).

1.5.1 Mesure du stock de COS

La mesure du stock de COS nécessitant les mesures de la teneur en COS, de la densité apparente et des éléments grossiers, sont souvent délicates, longues et coûteuses, et les pédologues cherchent à utiliser des méthodes plus simples, peu coûteuses et utilisables en grande série, notamment en cartographie.

A l'échelle mondiale, les premières estimations du stock de carbone organique contenu dans les sols datent principalement des années 1970 tandis que les premières cartes mondiales du stock de COS datent des années 1980 (Scharlemann et al., 2014). Les travaux de Batjes (1996) utilisèrent 4353 profils et fournirent des estimations du stock de COS en fonction de la profondeur de sol considérée : le stock de carbone organique était estimé entre 684 et 724 GtC sur 0-30 cm, 1462 -1548 GtC sur le premier mètre et compris entre 2376 -2456 GtC sur les deux premiers mètres. Une mise à jour par Batjes (2016) fournit de nouvelles estimations du stock de carbone organique du sol à : 755 GtC sur 0-30 cm, 1408 GtC sur 0-100 cm et 2060 GtC sur 0-200 cm. Cependant, il faut noter que même les estimations les plus récentes sont basées sur des données historiques collectées sur de longues périodes et non sur des données récentes (FAO, 2017). D'autre part, si le stock total de COS est estimé à 1500 GtC, les estimations présentent des incertitudes considérables dues aux différences de distribution spatiale de l'échantillonnage et aux méthodes de calculs, notamment pour la densité apparente et les éléments grossiers (Scharlemann et al., 2014). La cartographie des stocks de COS présente également des limites, notamment en termes de manques de données à des résolutions spatiales fines (profils de sol

manquants et cartes des sols non mises à jour) et de la profondeur de sol considérée qui est en général d'un mètre (Scharlemann et al., 2014). En 2016, le *Global Soil Partnership* a lancé dans le cadre de l'ODD 15.3.1 (proportion de terre dégradée par rapport à la superficie totale du terrain) un programme de cartographie des stocks de COS avec une approche participative nommé « Global Soil Organic Carbon map » (GSOCmap). Une carte mondiale du stock de COS sur 0-30 cm à une résolution de 1 km a été produite selon une approche participative où 110 pays ont compilés les données disponibles sur le sol au niveau national, l'objectif vis-à-vis du COS étant la mise en place d'un système de surveillance mondiale du COS basé sur la GSOCmap.

1.5.2 Nouvelles méthodes pour l'étude des sols et du carbone organique du sol

A l'échelle nationale ou régionale, l'un des principaux freins à l'évaluation du potentiel de séquestration de carbone organique du sol reste la mesure du carbone organique du sol, difficile et coûteuse. Le suivi de l'augmentation de COS à grande échelle est donc un facteur limitant (Smith et al., 2019). Le besoin de mise en place de systèmes de Mesure, Rapport (notification) et Vérification (ou MRV) (« Monitoring, Reporting, Verification » en anglais) à des échelles nationales ou régionales afin de fournir des indicateurs factuels et fiables pour la mise en œuvre de politiques d'atténuation du changement climatique destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à renforcer les puits est par conséquent primordial.

L'une des méthodes proposées pour mesurer le COS est la spectroscopie proche et moyen infrarouge (PIR et MR) qui a pour but d'identifier et d'analyser les interactions entre les longueurs d'ondes des spectres et les propriétés du sol (Janik and Skjemstad, 1995). De manière générale, le MIR fournit des pics d'absorption plus intenses et mieux résolus que le PIR (Nocita et al., 2015; Soriano-Disla et al., 2014). En science du sol, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est la méthode de spectroscopie vibrationnelle la plus utilisée (Parikh et al., 2014). Sa capacité à fournir des informations biologiques et minéralogiques, au laboratoire ou in situ, fait de cette approche une méthode idéale pour la science du sol. Souvent utilisée en réflectance diffuse (DRIFT), cette méthode est particulièrement intéressante en science du sol car elle ne demande qu'une préparation simple des échantillons de sol (séchage, tamisage et broyage), voir même aucune lorsque la mesure est *in situ*. De plus, le besoin d'un nombre important d'échantillons à analyser à une échelle régionale en fait également une technique avantageuse. La spectrométrie infrarouge est donc une technique rapide, non destructive et moins coûteuse que des analyses conventionnelles au laboratoire, à condition de disposer d'une librairie spectrale complète et de modèles de prédiction robustes.

L'utilisation de la spectroscopie par réflectance diffuse dans le proche infrarouge (PIR) pour étudier le sol remonte aux années 1960-1970 et se concentrait principalement sur la minéralogie des sols, tandis que l'utilisation de la spectroscopie PIR pour déterminer la teneur en matière organique du sol a commencé dans les années 1980 et s'est accentuée dans les années 1990 (Reeves, 2010). L'utilisation de la spectroscopie par réflectance diffuse dans le moyen infrarouge pour étudier les sols est encore plus récente. Une première analyse quantitative de spectres MIR avec des modèles sur les minéraux et la teneur en carbone organique remonte à l'année 1995 (Janik et al., 1995; Janik and Skjemstad, 1995; Reeves, 2010). Viscarra Rossel et al. (2006) montre le potentiel de la spectroscopie par réflectance diffuse et de la méthode PLSR pour prédire différentes propriétés du sol, dont la teneur en carbone organique du sol, à partir du visible et des différentes régions de l'infrarouge (PIR, MIR).

D'autre part, plusieurs études ont montré l'intérêt pour les pédologues de la spectroscopie proche (Demattê and da Silva Terra, 2014; Terra et al., 2018) et moyenne (Heil et al., 2019) infra-rouge combinées à des méthodes statistiques de classification pour caractériser et classifier les sols. Ils

définissent ainsi la pédologie spectrale comme étant « une évaluation détaillée et précise des spectres de sol obtenus par 'proximal and /or remote sensing', et analysés selon leurs informations qualitatives (forme, pics d'absorption et intensité) et /ou qualitative pour un échantillon ou un profil, où la convergence des preuves nous guide vers la probable classification du sol. »

1.5.3 Besoin, limites et potentialités pour les systèmes MRV

Le besoin de mise en place de systèmes MRV doit également répondre aux obligations des Etats à fournir des inventaires nationaux des émissions de GES dues aux activités anthropiques dans le cadre de l'Accord de Paris et des Contributions Déterminées au Niveau national (NDC en anglais) suivant les méthodologies développées par le GIEC qui se veulent transparentes, complètes, précises, fiables dans le temps et comparables entre pays (Smith et al., 2019). Pour le secteur agricole, ces inventaires restent le principal outil des politiques d'atténuation du changement climatique (Smith et al., 2019). La quantification des émissions de GES et des variations des stocks de carbone organique du sol est donc la base de ces inventaires.

Cependant, l'influence des facteurs biophysiques, édaphiques ou de gestion des terres, sur les variations de stocks de COS reste incomplète (Stockmann et al., 2013). De plus, la réversibilité de la séquestration dans le temps (lorsque les pratiques stockantes ne sont pas maintenues ou dans un contexte de variabilité ou changement climatique par exemple) est incertaine (Rumpel et al., 2019). Et la détection des faibles variations de stocks à court-terme est également un frein à une évaluation précise et fiable des changements de stocks de COS. Tous ces facteurs limitants font de la mise en place de systèmes MRV fiables, peu couteux, et simples un véritable challenge (Smith et al., 2019). Un nouveau cadre conceptuel est proposé par (Smith et al., 2019) et comprend un mix d'activités et de méthodes interconnectées qui permettent d'alimenter les systèmes MRV : des méthodes disponibles pour mesurer et surveiller le COS (section 1, 2 , 6 et 7) jusqu'aux modèles (section 3) et les données nécessaires pour tester ces modèles (4 et 5) (Figure 1.14).

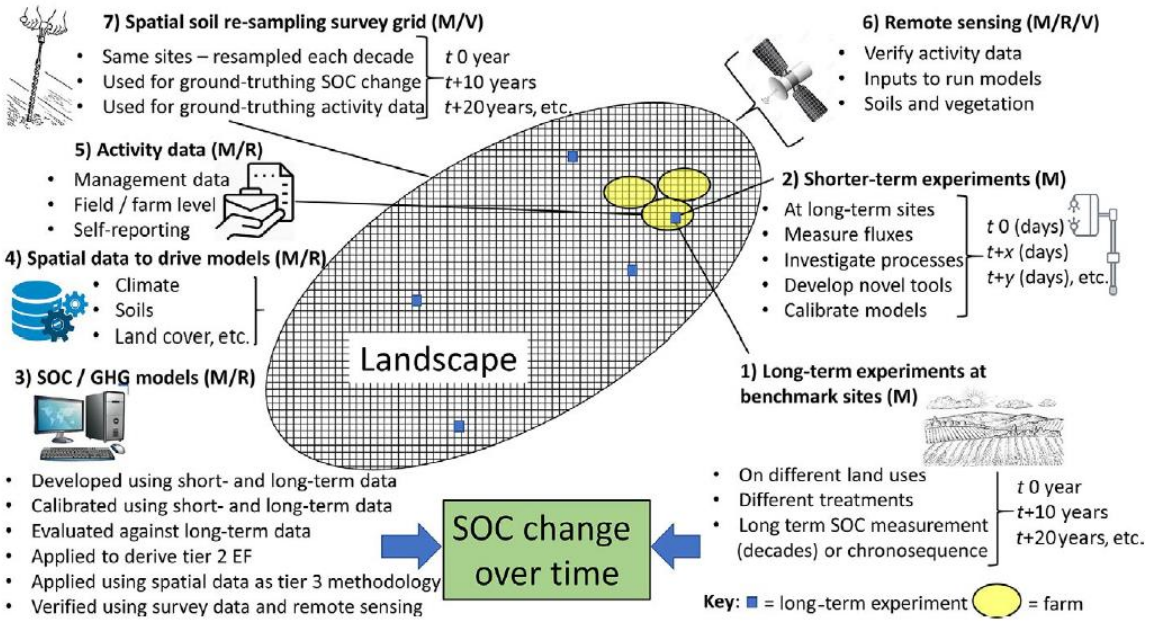


FIGURE 1.14 : ACTIVITES DE R&D CONTRIBUANT A L'EVALUATION ET AU SUIVI DES VARIATIONS DE SOC, EXTRAIT DE SMITH ET AL. (2019)

1.6 Objectifs et démarche

Le défi est donc de mettre en place des systèmes MRV fiables et peu couteux du stock de COS en développant les méthodes de mesure des stocks et variations de stocks de COS depuis l'échelle nationale à l'échelle territoriale. Le territoire de La Réunion, de par son insularité et son relief accidenté, est spatialement très hétérogène d'un point de vue pédologique et climatique. Un gradient d'altération des roches et des cendres volcaniques s'observe de haut en bas de la topo-séquence et est doublé d'une forte hétérogénéité spatiale du climat à la fois le long de la topo-séquence mais également entre la côte au vent très humide et la côte sous le vent sèche à semi-aride. En raison de ces gradients d'altération et climatique, la composition minéralogique des sols est diverse. Dans ces sols volcaniques tropicaux, l'hétérogénéité se retrouve également dans leur chimie, en particulier le carbone organique du sol. Or, il existe à La Réunion une base de données d'analyses de sols issue du laboratoire du CIRAD contenant plus de 46000 échantillons géoréférencés de sols, prélevés entre 1993 et 2017, dans différents types de sol et modes d'usages agricoles, et notamment sous culture de canne à sucre. L'analyse de cette base de données a pour but d'appréhender les processus pédologiques à l'origine de la forte hétérogénéité des propriétés des sols à différentes échelles spatiales, sur le territoire réunionnais.

L'objectif est donc d'adapter la méthodologie de mesure des stocks et des variations de stocks de COS à l'hétérogénéité du territoire étudié tout en valorisant une base de données préexistante. Plusieurs questions de recherche en découlent (Figure 1.15) :

1) Comment mesurer les stocks de COS de manière rapide, non destructive et peu coûteuse ?
2) Comment quantifier les stocks de COS des sols agricoles ?
3) Comment évaluer les variations de stocks de COS selon des changements d'usages des terres agricoles ?
4) Comment estimer les bilans de GES selon des scénarios de changements d'usages des terres agricoles à l'échelle de ce territoire ?

Le manuscrit de thèse propose dans le chapitre 2 de présenter l'hétérogénéité du milieu d'étude, les données et méthodes utilisées pour atteindre les objectifs. La méthodologie de mesure des stocks de COS par spectroscopie proche et moyen infrarouge *in situ* et au laboratoire est présentée dans le Chapitre 3 tandis que la méthodologie utilisée pour quantifier et cartographier les stocks de COS des sols agricoles ainsi qu'évaluer les variations de stocks de COS est présentée dans le chapitre 4. Enfin, le Chapitre 5 est l'application des variations de stocks de COS selon les changements de modes d'usages comme facteur d'émission Tier 2 dans le calculateur EX-ACT pour la réalisation de bilans GES suite à des scénarios de changements d'usages des terres agricoles. Le manuscrit se termine par une discussion générale synthétisant les résultats et proposant de nouvelles perspectives de recherche pour la mesure et le suivi du stockage de COS à l'échelle territoriale.

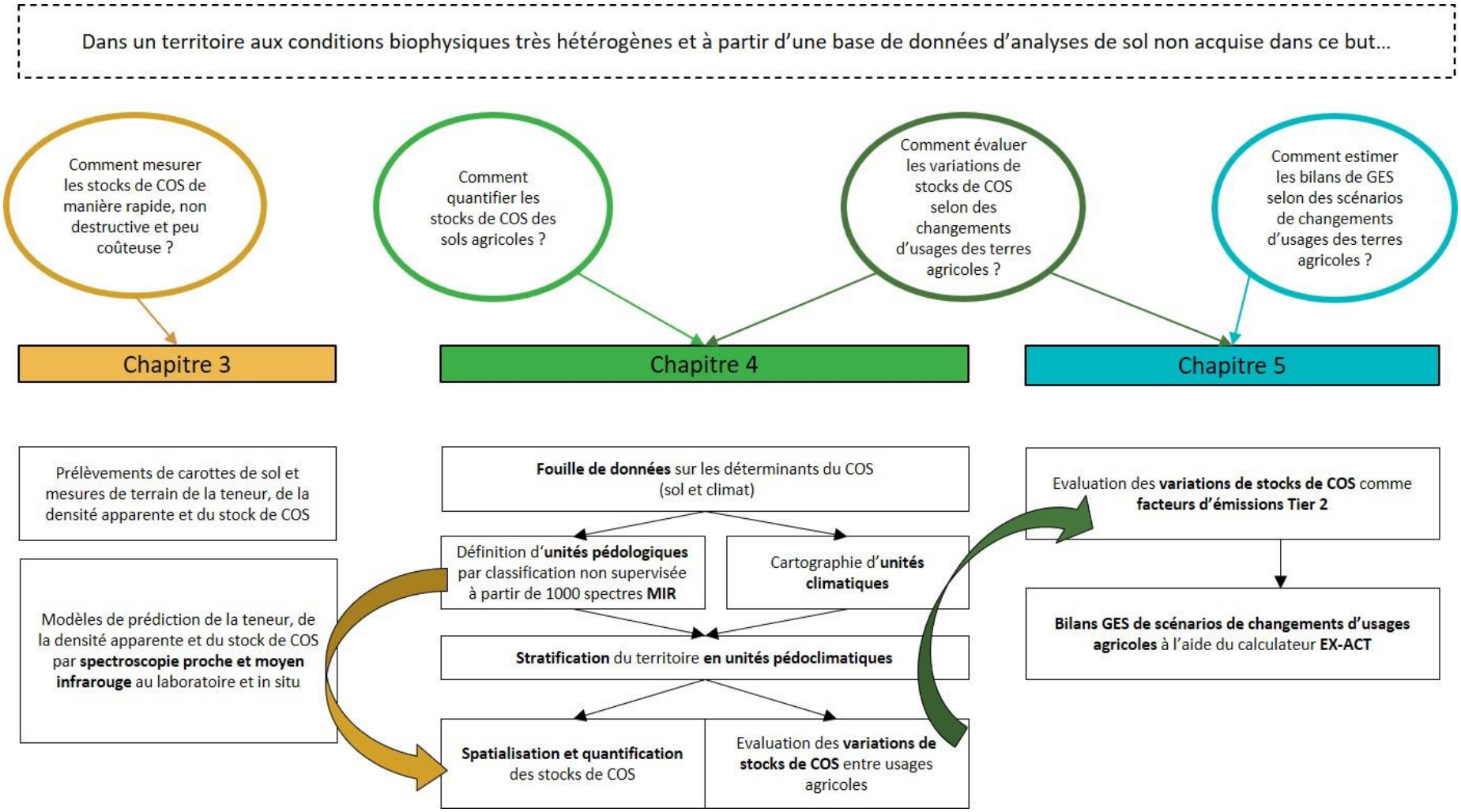


FIGURE 1.15 : STRUCTURATION DU MANUSCRIT DE THESE AUTOUR DES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

CHAPITRE 2



CHAPITRE 2. MILIEU, MATERIEL & METHODES

Cette étude a été réalisée sur le territoire de La Réunion, département d'outre-mer français (DOM) situé dans l'Océan Indien. La Réunion est une île montagneuse tropicale située à environ 21° de latitude Sud et 55° de longitude Est, à 700 km à l'ouest de Madagascar dans l'Océan Indien (Figure 2.1). D'une superficie de 2 500 km², l'île est la partie émergée d'un édifice de 7 000 m de hauteur sur une base de 240 km, seul 3% du volume total est donc émergé. La Réunion est constituée de deux volcans : le Piton des Neiges (3 069 m d'altitude), stratovolcan daté de 2 Ma et le Piton de La Fournaise (2 632 m), un volcan effusif né il y a 500 000 ans et classé parmi les volcans les plus actifs au monde. Le Piton des Neiges, fortement marqué par l'érosion avec ses trois grandes excavations appelés cirques, constitue les deux tiers de l'île tandis que le massif du Piton de La Fournaise, plus récent présente une activité effusive principalement au sein de sa caldeira au Sud-Est de l'île.

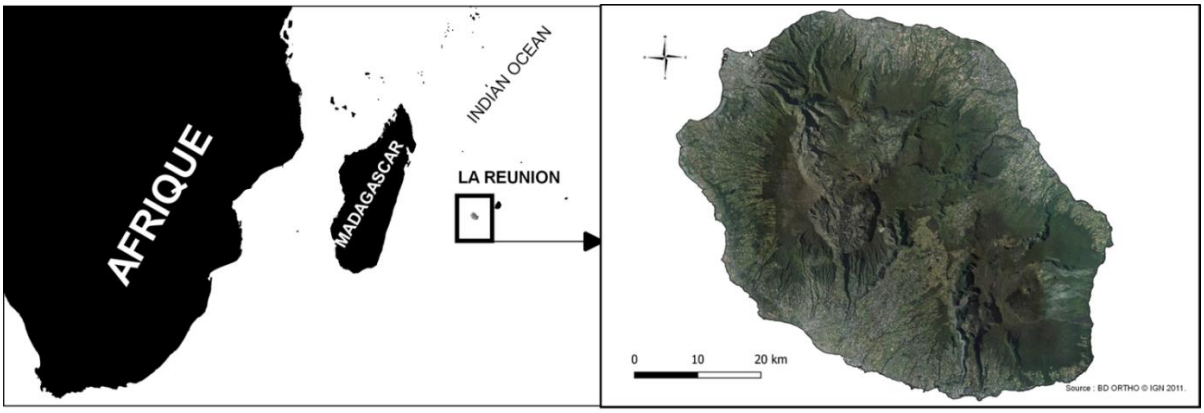


FIGURE 2.1 : LOCALISATION DE LA REUNION

Dans ce chapitre, le milieu d'étude sera décrit à travers la pédogenèse en zone volcanique tropicale qui caractérise La Réunion avant de présenter les données et méthodes utilisées dans ce travail de thèse.

2.1 Milieu : La Réunion, une île volcanique et tropicale

2.1.1 Les facteurs de la pédogenèse en zone volcanique tropicale

A la fin du 19ème siècle, le sol devient un objet d'étude en lui-même, avec sa dimension spatiale ; la science du sol n'est plus une simple étude de ses constituants physico-chimique (Boulaine, 1997). Pour l'école russe et notamment Dokoutchaev, le sol est le « résultat cumulé au cours des âges de l'action du climat et des êtres vivants sur les roches, nuancé par le relief et, dans certains cas, les nappes d'eau. Le sol est le 'miroir de la nature' » (Boulaine, 1997). Les facteurs de formation des sols seront ensuite définis par Hans Jenny en 1941 selon l'équation suivante : « Soil = f (Cl.o.r.p.t) ». Le sol est donc fonction du climat, des organismes vivants, de la topographie, de la roche mère et du temps (Jenny, 1941).

La pédogenèse est « l'ensemble des processus concourant à la formation et à l'évolution des couvertures pédologiques, au cours du temps, à partir des matériaux parentaux » (Baize, 2016). Mathieu and Lozet (2011) donne une définition plus précise de la pédogenèse : « Processus de formation de mise en place et d'organisation du sol, sous l'effet des agents du climat, de la faune et de la flore. Les mécanismes de la pédogenèse sont physiques (désagrégation des roches, érosion), chimiques (dispersion, précipitation, agglomération, lessivage, induration), biologiques (ameublissement, transport, accumulation). L'ensemble de ces mécanismes a pour résultat la formation des sols à partir du matériel initial et de la présence de matière organique, ainsi que leur développement y compris la différenciation des horizons » (Figure 2.2). La pédogenèse se subdivise en trois phases principales : altération des roches, intégration des matières organiques et transferts de matière. Le produit de l'altération est la fourniture de matériel minéral apte à intégrer lors d'une deuxième phase du matériel organique afin de créer une nouvelle entité, la « terre ». Le sol est alors formé lorsque les matières organiques sont liées aux matières minérales au sein du complexe argilo-humique. Puis, peu à peu, grâce à des transferts de matière, en parallèle de l'altération minérale qui continue, le sol s'organise progressivement en couches différenciées, les horizons (Gobat et al., 2003).

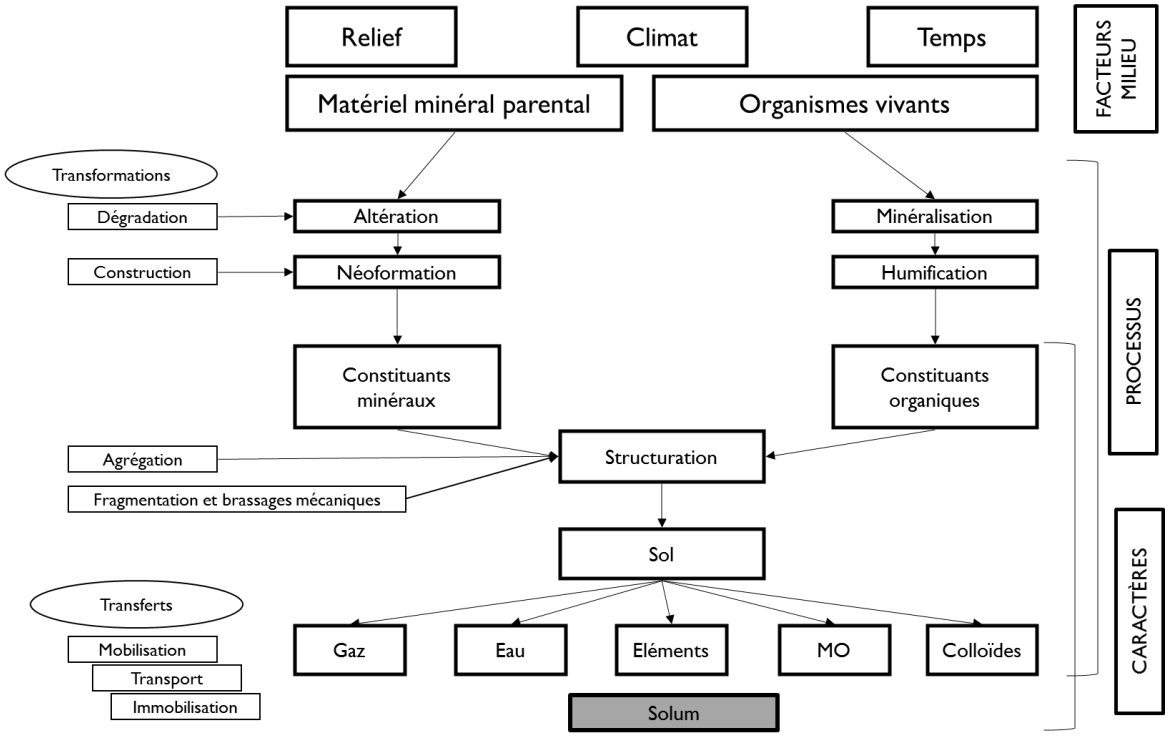


FIGURE 2.2 : PRINCIPES GENERAUX DE LA PEDOGENESE, D'APRES GOBAT ET AL. (2003)

A La Réunion, la pédogénèse est spécifique par le matériel parental que sont les roches volcaniques et par le climat tropical de l'île. Cependant, tous les sols de l'île ne peuvent qualifiés de sols volcaniques tropicaux. D'une part, le terme pédologique « tropical » n'est pas, comme il le suggère, totalement inféodé à la localisation de ces sols sous les tropiques, certains sols présents sous ces latitudes ne seront pas inclus dans la définition ainsi que certains sols peu développés. Un sol tropical, hormis les sols de volcanisme récent, est un sol ayant subi une altération biochimique extrême pendant de longues périodes de temps. Les sols tropicaux sont donc définis principalement par le climat et le stade de développement à partir de la roche mère et de la topographie (Finkl, 2008). Les sols classés comme

tropicaux sont : sous climat humide, les Sesquisols, Ferralsols, Nitisols, Acrisols, et sous climat avec alternance de période sèche et humide combiné à des températures élevées, les Lixisols, Luvisols et Vertisols (Finkl, 2008). A La Réunion, sont présents quelques Vertisols, des Ferralsols, des Nitisols et des Cambisols qui ont ici des propriétés proches des Ferralsols mais qui ont été rajeunis par érosion d'où leur dénomination sous le terme de Cambisol (sol « peu développé »). D'autre part, à La Réunion, la roche mère est par définition volcanique, que ce soit des laves ou des cendres. Par conséquent, tous les sols pourraient être qualifiés de sols volcaniques. Cependant, les sols qui se développent sur du matériel volcanique sont majoritairement les Andosols. L'altération rapide des matériaux volcaniques entrainent la formation de minéraux paracristallin (imogolites, allophanes) et/ou des complexes Al-humus. Ce sont ces constituants qui donnent leurs propriétés particulières à ces sols : faible densité apparente, thixotropie, une forte variabilité de la capacité d'échange en fonction du pH, une forte rétention du phosphore, etc… (Olafur, 2008). Mais avec le temps et des climats différents, les sols volcaniques peuvent conduire à toutes sortes d'autres sols. De manière générale, la roche mère à La Réunion ne contient pas de quartz, par conséquent, les sols ne sont pas sableux mais argileux.

2.1.1.1 Le facteur « p » : matériel minéral parental ou roche mère

Concernant l'origine de la formation de La Réunion, l'hypothèse la plus couramment admise est celle selon laquelle le point chaud à l'origine de La Réunion serait le même que celui à l'origine des gigantesques épanchements basaltiques du Deccan en Inde il y a 65 millions d'années, et de la formation de tout un chapelet d'îles d'âges de plus en plus récents, depuis les îles Maldives jusqu'à l'archipel des Mascareignes (îles de Maurice et Rodrigues) dont fait partie l'île de La Réunion, sortie des eaux il y a 3 Ma.

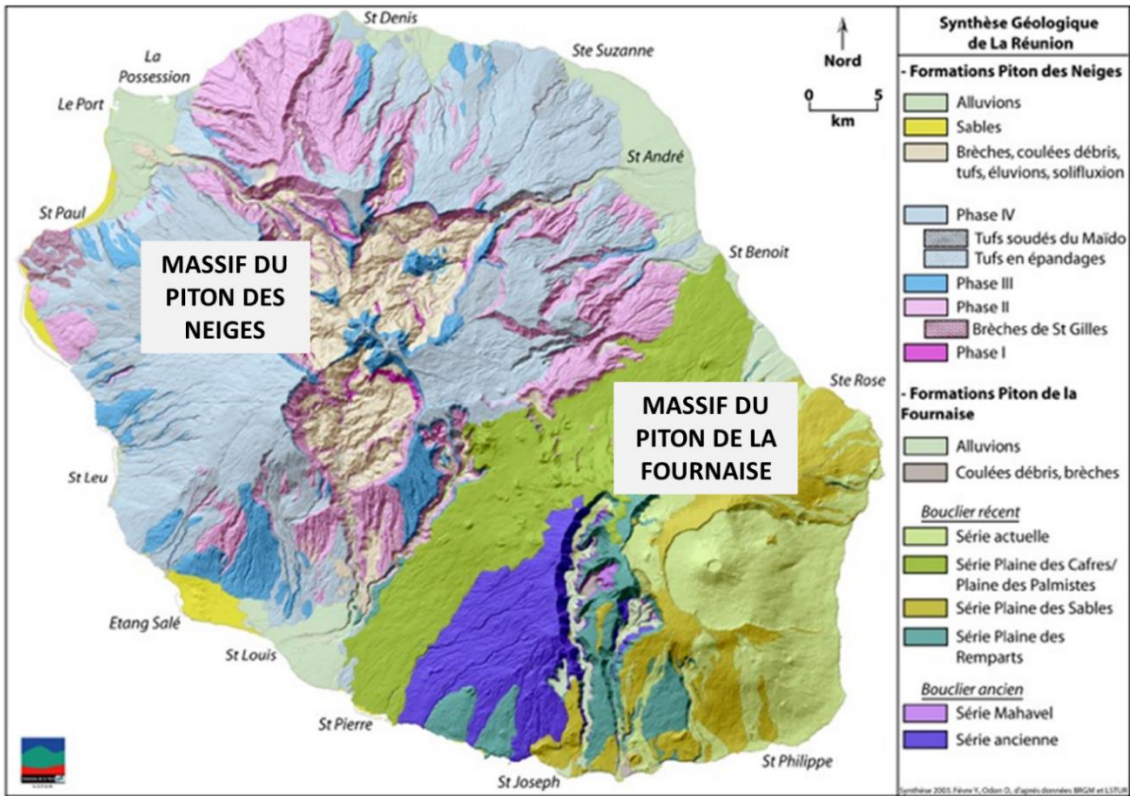


FIGURE 2.3 : CARTE GEOLOGIQUE DE LA REUNION (BRGM, 2006)

L'histoire géologique de La Réunion s'explique par ses deux massifs volcaniques : le Piton des Neiges, aujourd'hui inactif, culmine à 3 069 m et représente les deux-tiers de la surface de l'île ; et le Piton de La Fournaise, culminant à 2 632 m d'altitude et parmi les plus actifs au monde (Figure 2.3).

Après une longue construction sous-marine, l'histoire du Piton des Neiges se divise en deux grandes phases d'édification : un stade dit « basaltique » entre 2 Ma et 430 000 ans et un stade « différencié » entre 340 000 et 9 000 ans, séparés par une période intermédiaire caractérisée par une quasi-absence de dépôts (Cruchet et al., 2008). Les roches les plus anciennes à l'affleurement sont datées de 2.2 Ma (McDougall, 1971) et de 2.5 Ma en domaine sous-marin (Smietana, 2010). Durant la phase d'émersion et de construction de l'essentiel du volcan bouclier, les laves émises pendant le stade « basaltique » sont des océanites (basaltes à olivine cumulative), des basaltes à olivine ou des basaltes aphyriques. Au cours de cette période, le massif est un vaste dôme surbaissé d'un diamètre moyen émergé de 50 km et d'une hauteur supérieure à 2 000 m. Un stade intermédiaire entre 430 000 ans et 340 000 ans se caractérise par une faible activité volcanique. Le stade différencié correspond au troisième et dernier stade d'édification du massif du Piton des Neiges en strato-volcan. De 340 000 ans à 180 000 ans, les produits volcaniques évoluent alors des hawaïtes vers des produits pyroclastiques. Lorsque les dépôts sont épais et très indurés, ils sont nommés « ignimbrites ». De 180 000 à 140 000 ans, l'érosion du massif prédomine. De 140 000 à 70 000 ans, l'essentiel de la partie centrale du Piton des Neiges se construit par la mise en place d'importantes quantités d'hawaïtes sur plus de 800 m d'épaisseur. De 70 000 ans à 35 000 ans, l'activité volcanique met en place des laves différenciées (trachytes, commendites, mugéarites, benmoréites) et devient ensuite de plus en plus explosive. Finalement, de 35 000 ans à 9 000 ans, le Piton des Neiges atteint une altitude maximale de 3 400 m (Kluska, 1997). L'activité terminale du volcan du Piton des Neiges est limitée au sommet du Piton des Neiges et a engendré des accumulations de scories rouges et de bombes fusiformes (Lacquement and Nehlig, 2014). Entre – 70 000 ans et – 9 000 ans, les deux volcans sont simultanément actifs. Entre les deux, dans la région de la Plaine des Cafres, une activité volcanique explosive et effusive forme des dizaines de pitons qui émettent des volumes considérables de laves, formant les pentes actuelles du Tampon, de la Plaine des Palmistes et Saint-Benoit (Nehlig and Bucelle, 2005).

Si le Piton des Neiges cesse son activité il y a 9 000 ans, le Piton de la Fournaise, qui s'est développé sur le flanc sud-est du Piton des Neiges, sous le nom du Volcan des Alizés entre 1 Ma et 500 000 ans, présente encore aujourd'hui une activité volcanique, principalement effusive. Les différentes étapes de son volcanisme restent visibles aujourd'hui grâce aux vestiges de ces caldeiras successives (Caldeira des Remparts, Caldeira des Sables et la Caldeira de l'enclos Fouqué). Un volcan bouclier a ensuite recouvert les laves du Volcan des Alizés. La rivière des Remparts est le vestige de la caldeira d'effondrement de ce bouclier ancien datant de 450 000 ans à 150 000 ans. Entre 150 000 et 4700 ans, le volcan, dénommé « bouclier récent », produit de nouvelles coulées de lave avant de s'effondrer pour former une nouvelle caldeira : la caldeira des Sables. Enfin, le Piton de La Fournaise, a débuté son activité volcanique il y a 4 700 ans qui se poursuit aujourd'hui dans sa caldeira : l'Enclos Fouqué (Nehlig and Bucelle, 2005). Cependant, s'il a eu une activité volcanique principalement effusive, le Piton de La Fournaise a connu une activité explosive émettant des lapili et cendres basaltiques, dont les couches sont d'autant plus épaisses que les basaltes qu'elles recouvrent sont anciens (Raunet, 1991).

Les produits volcaniques de La Réunion sont divers de par leur mise en place selon des dynamiques volcaniques différentes. On peut distinguer des produits intrusifs tels que les dykes, conduits du magma vers la surface ou les chambres magmatiques dont le magma a cristallisé en profondeur. On retrouve ces formations dans les cirques du Piton des Neiges. Les produits effusifs, que l'on retrouve principalement sur les pentes du Piton de La Fournaise aujourd'hui, sont de deux types différents : les coulées 'pahoehoe' (ou en cordes) sont des laves fluides, généralement basaltiques ou des laves de

type ‘aa’ (en gratons), plus visqueuses dont la surface est morcelée. Les produits volcanoclastiques regroupent les matériaux éjectés (ponces, cendres, lapili, bombes) par dégazage et fragmentation lors d’une ascension rapide du magma vers la surface (éruption strombolienne ou plinienne) et les matériaux issus (hyaloclastite) de la fragmentation du magma au contact d’un réservoir d’eau (éruption phrétaomagmatique) (Nehlig and Bucelle, 2005). Ces deux volcans, différents par leur âge et leurs produits volcaniques, offrent différents matériaux parentaux à partir desquels plusieurs types de sols se sont formés.

2.1.1.2 Le facteur « r » : un relief abrupt

Le Piton des Neiges, avec une altitude de 3 070m est le point culminant de l’Océan Indien tandis que le Piton de La Fournaise culmine à 2632 mètres sur une superficie de 2512 km² seulement, faisant de La Réunion une île avec un relief très marqué. De plus, le massif du Piton des Neiges présente trois grandes dépressions d’un diamètre de 10 km environ : ce sont les cirques de Mafate, Salazie et Cilaos. Profonds de plus de 1500 mètres, ces pentes laissent imaginer la puissance de l’érosion sous ces latitudes pour former un relief aussi abrupt.

En effet, si l'île de La Réunion est le résultat d'une activité volcanique intense, ses principaux traits morphologiques sont tout autant liés à une très forte érosion. C'est la forte pente de l'édifice volcanique combinée à une pluviométrie très forte (pendant la saison chaude et humide, de décembre à avril, et lors des cyclones) qui est à l'origine de processus d’érosion. A La Réunion, trois mécanismes principaux d’érosion existent : des mouvements de terrain (éboulements, écroulements, glissements), des avalanches de débris et des coulées de débris et de boue (lahars). Cette érosion, souvent spectaculaire, peut mettre en mouvement des éléments de grandes tailles et de volumes de roches importants qui sont repris par l'eau, transportés et déposés plus en aval dans les cours d'eau et les cônes alluviaux ou emmenées en mer. Les avalanches de débris sont liées à la mise en place du strato-volcan dont la croissance est si importante que le volcan finit par se déstabiliser sous son propre poids, suite à un séisme, de nouvelles coulées de laves ou d’autres causes externes. Les avalanches de débris mobilisent des quantités de matériaux de plusieurs km^3 dans un laps de temps très court. Les coulées de boues, liées à des pluies violentes ont également eu lieu sur les pentes du volcan et peuvent entrainer des blocs de plusieurs mètres. Les mouvements de terrain sont des phénomènes inéluctables, dus à des processus lents d’érosion favorisés par l’action de l’eau et de l’homme. On différencie les glissements de terrains qui concernent les matériaux meubles des éboulements et chutes de blocs qui concernent des matériaux massifs (Nehlig and Bucelle, 2005). Les sols se sont donc développés sur ces formations, ont été éliminés ou ont été rajeunis par certains de ces processus.

2.1.1.3 Le facteur « Cl » : une île de la zone intertropicale avec une variété de climats

Le climat de La Réunion est globalement de type tropical humide mais il se singularise surtout par une grande variabilité liée à la géographie de l'île (Figure 2.4Figure 2.4). L'influence du relief est tout aussi fondamentale que les effets de l'insularité. Cette élévation altitudinale a pour effet un étagement très important des températures, les températures moyennes annuelles s’échelonnent ainsi de 12°C sur les parties les plus hautes de l’île jusqu’à 28°C sur la côte. Selon la classification des zones climatiques du GIEC (IPCC, 2006), La Réunion présente effectivement des climats tropicaux (Tropical Wet, Moist and Dry) mais également un climat tempéré (Warm Temperate Moist) dans les hauteurs de l’île correspondant à un climat tropical à tendance montagnarde.

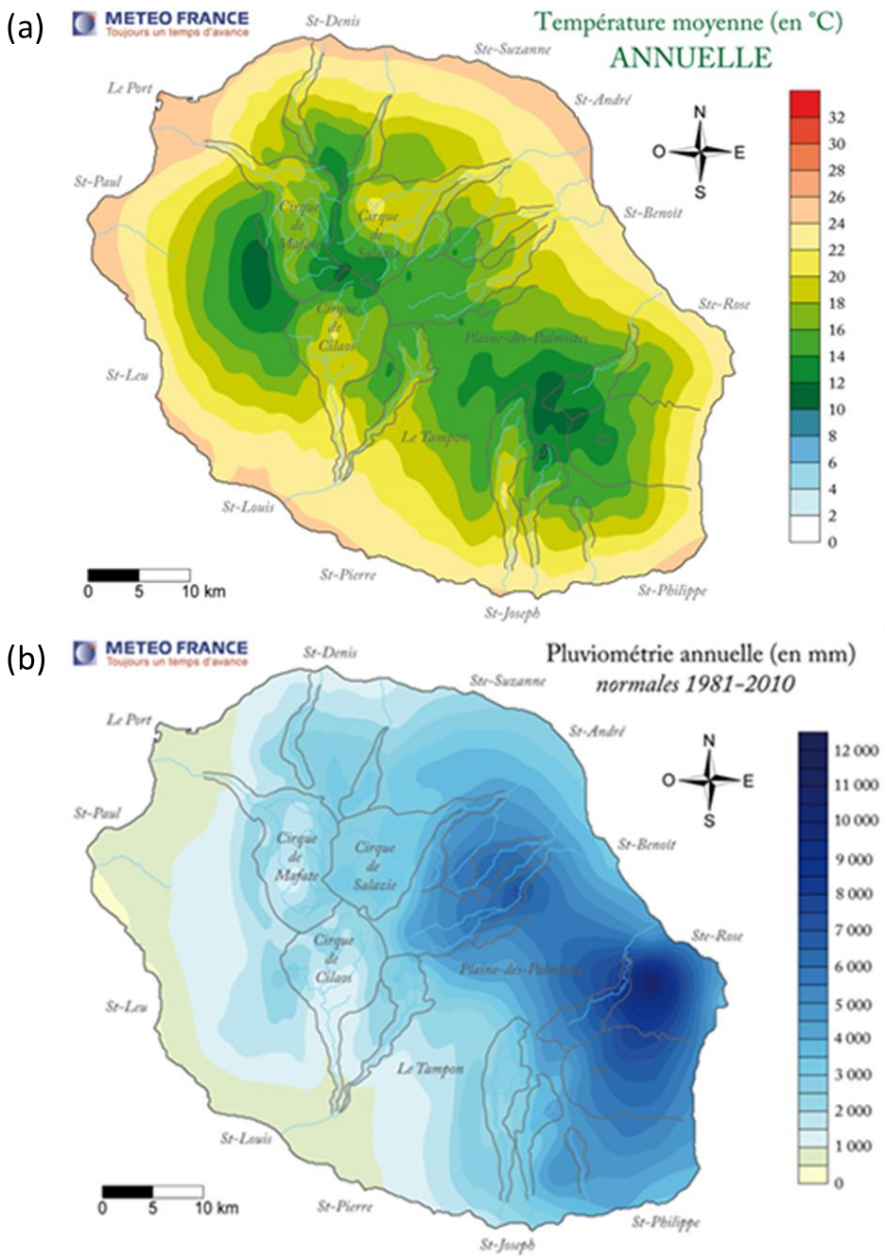


FIGURE 2.4 : TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE (A) ET PLUVIOSITE ANNUELLE (B)

A La Réunion, la direction des alizés est en généralement est-sud-est, mais elle oscille entre nord-est et sud-est. L'interaction des alizés avec le relief de l'île a des conséquences très importantes sur son climat. Le relief a pour effet de bloquer les perturbations venant de l'Est apportées par les vents d'alizés : les pluies restent alors bloquées sur la côte « au vent ». Les nuages subissent alors un soulèvement orographique, condensent et génèrent de fortes précipitations. Ce phénomène explique la pluviométrie exceptionnellement élevée de l'Est de l'île avec des pluviosités annuelles allant jusqu'à plus de 6 m d'eau par an alors qu'elles sont inférieures à 1 m au niveau de la côte « sous le vent » à l'Ouest de l'île. La place de La Réunion parmi les régions les plus arrosées au monde se justifie par l'accumulation des pluies engendrées par les alizés et par les cyclones, dont la violence des vents, les pluies torrentielles peuvent provoquer d'importants dégâts.

2.1.1.4 Le facteur « o » : les organismes vivants

La végétation intervient sur la formation des sols directement par ses racines vivantes et indirectement par ce qui retourne au sol chaque année (résidus, paille, …). En théorie les algues, les bactéries, les champignons et les animaux du sol fournissent de la matière organique au sol mais la photosynthèse est la source majeure de matière organique au sol (Legros, 2007). Les mouvements de matière (bioturbation) dus aux déplacements des organismes vivants, vers de terre (en climat tempéré), fourmis et termites (en climat tropical) mais aussi l'homme impacte également les sols par brassage et fragmentation mécanique (ameublissement mécanique, oxygénation des parties profondes, redistribution de la MO, remontée en surface d'éléments enfouis, neutralisation du pH) (Gobat et al., 2003). Le climat agit directement sur le sol (température, pluviosité…) mais conditionne aussi la nature de la végétation, végétation qui joue un rôle dans la différenciation des sols tandis que le sol joue un rôle dans la sélection des végétaux qu'il porte. Le système est donc complexe et en perpétuelle interaction (Legros, 2007). A La Réunion, la végétation naturelle forestière n'est présente aujourd'hui uniquement dans les hauts de l'île et dans les zones protégées tandis que les zones cultivées se trouvent majoritairement dans les bas de versants (Figure 2.5).

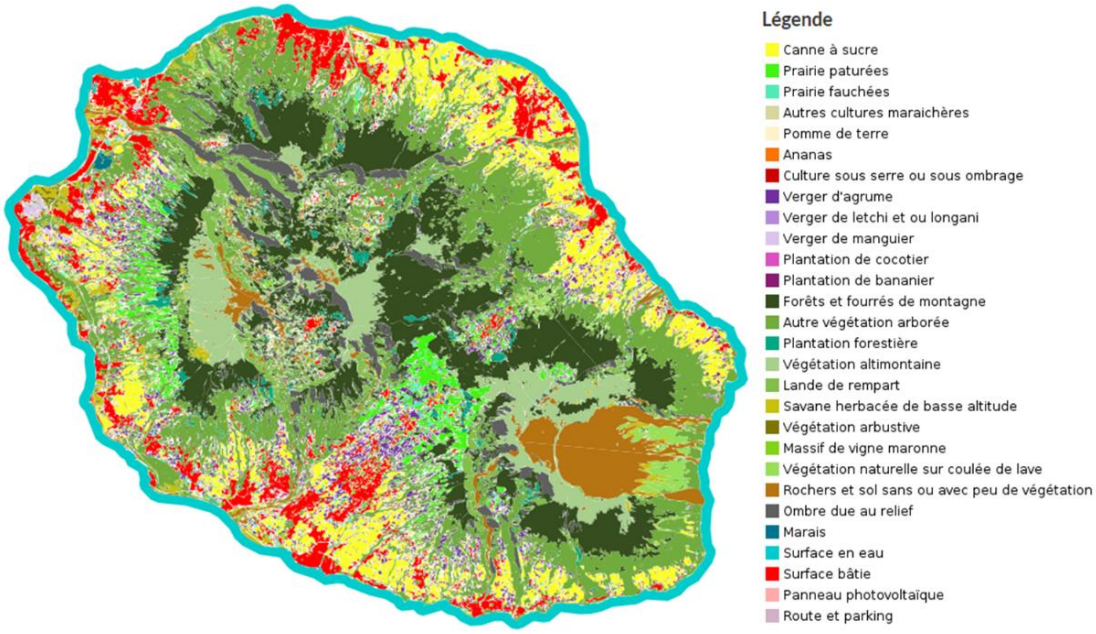


FIGURE 2.5 : CARTE D'OCCUPATION DU SOL (DUPUY, 2018)

2.1.1.5 Le facteur « t » : le temps

Le temps, quant à lui, joue son rôle pour chaque facteur, c'est le facteur commun à tous les processus impliqués dans la pédogenèse. Cependant, si l'âge d'un sol correspond au temps écoulé entre le début de la pédogenèse et aujourd'hui, la notion de temps de la pédogenèse est principalement son degré d'évolution c'est-à-dire « l'état dans lequel il [le sol] se trouve actuellement, en tant que produit des processus physiques, chimiques et biologiques qui s'y sont déroulés ». Des sols de même âge peuvent donc présenter des degrés d'évolution différents (Gobat et al., 2003).

2.1.1.6 Des séquences de sol résultant de tous ces facteurs

Les sols résultent donc de tous ces facteurs : du climat, des organismes vivants, de la topographie, de la roche mère et du temps. Le cas particulier de l'évolution des sols dérivés de roches volcaniques pyroclastiques en fonction du temps et du climat est décrit par (Quantin, 1991) (Figure 2.6). En climat tropical, les Andosols, développés directement sur les cendres volcaniques, se transforment, avec le temps et suivant le type de climat sous lequel ils se développent, en d'autres types de sols : sols Bruns, sols Fersiallitiques, Ferrallitiques ou encore Vertiques.

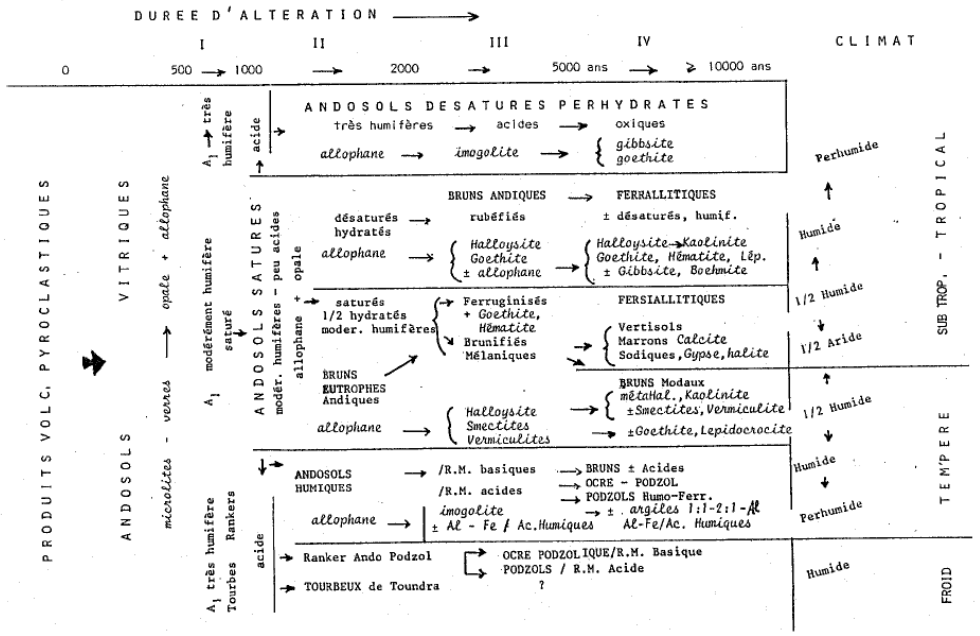


FIGURE 2.6 : SCHEMA D'EVOLUTION DES SOLS SUR DEPOTS PYROCLASTIQUES EN FONCTION DU CLIMAT ET DU TEMPS

Ce sont sur les pentes des îles volcaniques que l'on retrouve alors ces évolutions sur une même topo-séquence. Les sols s'organisent souvent de haut en bas du profil, on est alors en présence d'une chaine de sol ou « catena ». A La Réunion, Feder and Bourgeon (2009) décrivent une topo-séquence dans l'Ouest de l'île, allant des Andosols jusqu'à des Cambisols de haut en bas de la séquence (Figure 2.7).

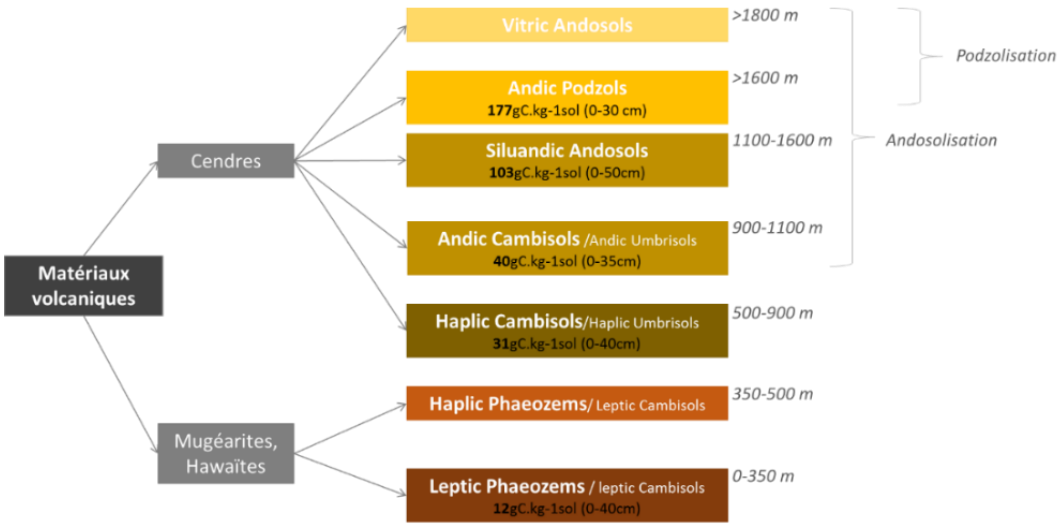


FIGURE 2.7 : SEQUENCE DE SOLS SUR MATERIAUX VOLCANIQUE DE L'ILE DE LA REUNION D'APRES FEDER AND BOURGEON (2009)

Le processus d'andosolisation en milieu tropical est une hydrolyse acide des verres volcaniques qui produit des minéraux paracristallins (allophanes, imogolites) capables d'adsorber et de stabiliser les matières organiques pour former des complexes organo-minéraux où les ions minéraux sont bloqués par les composés carbonés et ne peuvent co-précipiter pour former des argiles minéralogiques (Figure 2.8). De plus, l'état d'hydratation élevé et permanent en climat humide favorise la formation abondante et renouvelée de ces gels amorphes d'allophanes et imogolites. Cette altération des verres volcaniques est accompagnée d'une perte de bases et de désilification de l'ensemble du matériau. En effet, les roches magmatiques ont des teneurs en Si bien plus fortes qu'en Al, de 2.5 à 5 fois plus élevées, or dans ces sols le rapport Si est inférieur à 1 Al. Il y a donc des pertes importantes de silice dans les Andosols, notamment dans les climats les plus humides (qui sont aussi les plus favorables à l'accumulation de matière organique) : il y a compétition de l'humus et de la silice pour l'aluminium (Legros, 2007).

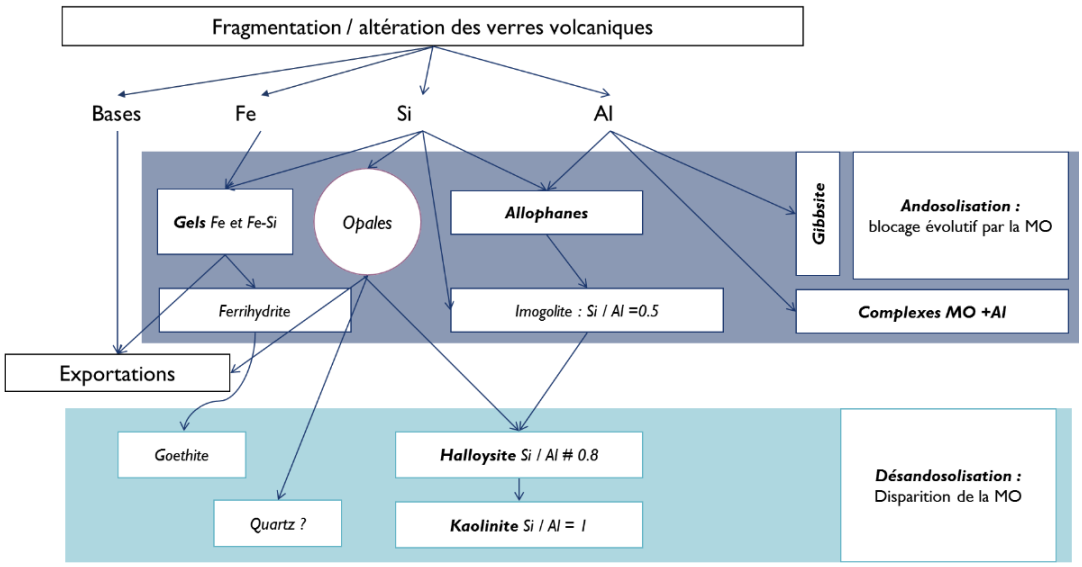


FIGURE 2.8 : ANDOSOLISATION ET DESANDOSOLISATION DES ANDOSOLS ALLOPHANIQUES, D'APRES LEGROS (2007)

Ces sols, résultant de l'altération modérée de dépôts essentiellement pyroclastiques, sont des Andosols, du japonais « ando » qui signifie « sol noir » car souvent riches en matière organique. La présence de minéraux paracristallins et/ou de complexes organo-métalliques (Al-humus) sont des signes de propriétés andiques. Ces minéraux et complexes sont une des étapes de la séquence d'altération classique des dépôts pyroclastiques (matériau téphrique → propriétés vitriques → propriétés andiques). La classification WRB définit des propriétés vitriques, qui se distinguent des propriétés andiques par un degré moindre d'altération, une teneur moindre en Al_o et Fe_o, une densité apparente plus élevée et une rétention moindre en phosphates, et des propriétés andiques : une densité apparente inférieure à 0.90 kg dm^{-3}, $Al_o + ½ Fe_o$ de 2% et plus dans la fraction fine, une rétention du phosphore supérieure à 85% (IUSS Working group WRB, 2014).

On peut distinguer trois types d'Andosols principaux bien que la classification WRB présente d'autres qualificatifs : les Andosols vitiriques, peu évolués, riches en minéraux primaires et particulièrement en verre mais qui contiennent déjà des minéraux paracristallins ; les Andosols silandiques, riches en allophanes, imogolites et ferrihydrite, avec un pH compris entre 4.9 et 7-8, une teneur en Sio ≥ 0,6 %

ou un rapport Al_p / Al_o < 0,5 ; et les Andosols aluandiques, riches complexe Al-humus (andosols non allophaniques), avec un pH inférieur à 4.9, une teneur en Si_o < 0,6 % et un rapport Al_p / Al_o ≥ 0,5. Ces sols s'observent dans les situations les plus humides et les plus froides. Ils sont souvent les plus riches en matière organique avec une couleur noirâtre. Les propriétés alusilandiques transitionnelles ont des teneurs en Si_o ≥ 0,6 et < 0,9 % et un rapport Al_p / Al_o ≥ 0,3 et < 0,5 (Poulenard and Herbillon, 2000) et sont considérées comme un cas particulier des propriétés silandiques (IUSS Working group WRB, 2014).

A La Réunion, la prépondérance des imogolites et allophanes dans les horizons B semble due majoritairement à l'altération des verres issus des cendres volcaniques. Les formations cendreuses recouvrent une large partie des sols de La Réunion, elles sont constituées de verre basaltique, de phénocristaux isolés de feldspath, d'olivine, de clinopyroxènes, de magnétite et d'ilmétite (Denaix, 1989; Rosello, 1984). Chaque émission et dépôt de cendres a constitué, pour les formations superficielles qu'il recouvrait un apport de matériaux sains recouvrant les apports anciens, que ce soient des coulées de laves ou des dépôts cendreux. L'altération des cendres est plus rapide et plus intense que celle des coulées basaltiques mais les cendres se transforment selon le même processus que dans les coulées de basalte, principalement par départ des bases et désilicification. Les produits néoformés, allophanes et imogolites sont associés à du fer en partie cristallisé en goethite et de la gibbsite (Rosello, 1984).

En revanche, lorsque le climat est moins humide, la durée d'altération plus longue, le milieu moins drainant ou l'altération de la roche plus difficile (laves à faible porosité), des argiles apparaissent par néoformation, c'est la désandosolisation (Figure 2.8). Les Andosols à matériaux amorphes laissent la place à des sols à halloysite. Lorsque l'altération est encore plus poussée, sous climat chaud et humide, on retrouve alors des Ferralsols. Les argiles néoformées sont des kaolinites associées à des oxydes et hydroxydes de Fe et d'Al (goethite, hématite). En climat sec, les basaltes, riches en bases tout en contenant des quantités suffisantes en SiO_2, peuvent également donner des smectites par néoformation formant ainsi des Vertisols (Legros, 2007). A La Réunion, les Andosols laissent place à des Cambisols (sol Bruns), des Ferralsols et quelques Vertisols.

2.1.2 Des sols étudiés depuis les années 1960

De nombreux travaux de recherche sur les sols ont été menés à La Réunion au 20ème siècle, des travaux cartographiques (Feder and Bourgeon, 2009; Raunet, 1991; Riquier, 1960) et minéralogiques (Denaix, 1989; Gense, 1976; Rosello, 1984; Zebrowski, 1975). La mise à jour de la carte des sols, réalisée sur le versant Ouest de La Réunion par Feder and Bourgeon (2009) et sa comparaison avec les travaux antérieurs (Figure 2.9) est l'occasion de montrer les évolutions en matière de typologie de sols.

<table>
<tr><th>Altitude (m)</th><th>Riquier (1960)</th><th>Zebrowski (1975)</th><th>Raunet (1988)</th><th>Cette étude (2009)</th></tr>
<tr><td>1850 et +</td><td rowspan="6">Sols ferrallitiques beiges organiques et sols à mascareignite, lithosols organiques</td><td rowspan="6">Podzols</td><td>Affleurements et Andosols vitriques</td><td>vi AN</td></tr>
<tr><td>1800 - 1850</td><td rowspan="5">Andosols désaturés à mascareignite</td><td rowspan="5">an PZ</td></tr>
<tr><td>1750 - 1800</td></tr>
<tr><td>1700 - 1750</td></tr>
<tr><td>1650 - 1700</td></tr>
<tr><td>1600 - 1650</td></tr>
<tr><td>1550 - 1600</td><td rowspan="12">Sols ferrallitiques beiges</td><td rowspan="7">Andosols</td><td rowspan="6">Andosols désaturés perhydratés</td><td rowspan="6">sn AN</td></tr>
<tr><td>1500 - 1550</td></tr>
<tr><td>1450 - 1500</td></tr>
<tr><td>1400 - 1450</td></tr>
<tr><td>1350 - 1400</td></tr>
<tr><td>1300 - 1350</td></tr>
<tr><td>1250 - 1300</td><td rowspan="6">Andosols désaturés</td><td rowspan="2">sn AN, an UM et an CM</td></tr>
<tr><td>1200 - 1250</td></tr>
<tr><td>1150 - 1200</td></tr>
<tr><td>1100 - 1150</td></tr>
<tr><td>1050 - 1100</td></tr>
<tr><td>1000 - 1050</td></tr>
<tr><td>950 - 1000</td><td rowspan="5">Sols ferrallitiques andiques</td><td rowspan="5">ha UM et ha CM</td></tr>
<tr><td>900 - 950</td></tr>
<tr><td>850 - 900</td></tr>
<tr><td>800 - 850</td></tr>
<tr><td>750 - 800</td></tr>
<tr><td>700 - 750</td><td rowspan="11">Sols ferrallitiques bruns et sols ferrallitiques brun-rouges</td><td rowspan="5">Sols bruns andiques</td></tr>
<tr><td>650 - 700</td><td rowspan="10">Sols ferrallitiques</td></tr>
<tr><td>600 - 650</td></tr>
<tr><td>550 - 600</td></tr>
<tr><td>500 - 550</td></tr>
<tr><td>450 - 500</td><td rowspan="2">ha PH et le CM</td></tr>
<tr><td>400 - 450</td><td>Sols bruns et affleurements</td></tr>
<tr><td>350 - 400</td><td rowspan="9">Lithosols</td><td rowspan="9">(pas de données)</td><td rowspan="7">Sols bruns ferruginisés</td><td rowspan="8">le PH et le CM</td></tr>
<tr><td>300 - 350</td></tr>
<tr><td>250 - 300</td></tr>
<tr><td>200 - 250</td></tr>
<tr><td>150 - 200</td></tr>
<tr><td>100 - 150</td></tr>
<tr><td>50 - 100</td></tr>
<tr><td>0 - 50</td><td>Sols vertiques et affleurements</td></tr>
</table>

FIGURE 2.9 : COMPARAISON SYNTHETIQUE DES ETUDES PEDOLOGIQUES REALISEES SUR UN VERSANT OUEST DE L'ILE DE LA REUNION, EXTRAIT DE (FEDER AND BOURGEON, 2009) PREFIXES UTILISES : VI (VITRIC), AN (ANDIC), SN (SILANDIC), HA (HAPLIC), LE (LEPTIC). GROUPE DE SOLS DE REFERENCE UTILISES : AN (ANDOSOLS), PZ (PODZOLS), UM (UMBRISOLS), CM (CAMBISOLS), PH (PHAEOZEMS)

Les travaux de datation des laves par les géologues ont permis aux pédologues de cartographier de plus en plus précisément les sols de La Réunion. Les premiers travaux cartographiques effectués par Riquier (1960), basés sur une estimation de l'âge des laves comprise entre 5 et 2 Ma (Bussière, 1958), décrivent en majorité des sols Ferrallitiques sur toute la séquence altitudinale, c'est-à-dire des sols où l'altération des minéraux primaires étaient poussée avec la formation de minéraux secondaires tels que la kaolinite, hydroxydes d'alumine et oxy-hydroxydes de fer. En 1975, Claude Zebrowski étudiait une climato-séquence sur le versant occidental du massif du Piton des Neiges. Les datations effectuées par McDougall en 1971 démontrent alors que les roches sont bien plus jeunes avec un âge compris entre 250 000 et 210 000 ans mais Zebrowski (1975) ne mentionne pas les recouvrements cendreux, identifiés par Bertrand en 1972. Zebrowski (1975) identifie, comme Riquier (1960), des sols Ferrallitiques en bas de séquence et démontre la présence d'halloysite et de metahalloysite dans ces sols mais contrairement à Riquier (1960), à partir de 900 m, il décrit des Andosols jusqu'à 1500 m avec

la présence de produits amorphes puis des Podzols jusqu'en haut de la séquence. Il identifie également une présence importante de gibbsite dans les sols Ferrallitiques à caractère andique et dans les Andosols.

2.1.2.1 Des sols cartographiés

En 1991, la carte morpho-pédologique, et non strictement pédologique, de La Réunion à l'échelle du 1/50 000 a été établie par l'IRAT, et identifie 93 unités de milieu pédologique (Figure 2.10a), décrites de manière détaillée dans une notice (Raunet, 1991). Ces unités se regroupent en plusieurs grandes catégories de sol, en plus des coulées brutes, des sables littoraux et des alluvions. Cinq grandes catégories de sol se distinguent :

Les sols **Ferrallitiques**, épais et rougeâtre, sans éléments grossiers, se retrouvent sur les roches les plus anciennes, dans le Nord (entre Saint-André et Saint-Denis) et localement au Sud-Ouest de l'île. La pédogénèse ferrallitique nécessite la combinaison d'un temps long et d'un climat chaud et humide favorisant une hydrolyse poussée des minéraux primaires : libération et lessivage importants de la silice, élimination des bases. Puis, se forment des alumino-silicates secondaires argileux cristallisés : à La Réunion, il s'agit de metahalloysite et d'halloysite. Le fer et l'aluminium libérés donnent des oxy-hydroxydes de fer (hématite, goethite) et d'aluminium (gibbsite).

Les sols **Fersiallitiques**, profonds et de coloration brun-rougeâtre, se retrouvent sur les coulées d'hawaïtes du versant occidental de l'île, généralement en dessous de 500 m d'altitude et montrent une évolution moins poussée que les sols ferrallitiques. Les minéraux cristallisés sont un mélange de metahalloysite, halloysite, smectite et interstratifiés.

Les sols **Bruns**, moins profonds que les sols ferrallitiques et fersiallitiques, de couleur brun rougeâtre à brun-foncé, se retrouvent principalement à l'Ouest de l'île sous un climat moyennement ou peu pluvieux. L'altération y est moins avancée, on retrouve un mélange d'halloysite, d'oxydes de fer et éventuellement d'interstratifiés. La pierrosité peut y être importante en raison des roches non altérées qui libèrent des bases et maintiennent un pH proche de la neutralité.

Les **Vertisols** représentent une faible surface à La Réunion et sont localisés sur le littoral occidental en dessous de 250 m d'altitude où la pluviosité est faible et la saison sèche marquée. Ces sols se caractérisent par leur richesse en argiles gonflantes de la famille des smectites et sont associés à des affleurements rocheux nombreux.

Les **Andosols**, de couleur brun-jaune à brun-chocolat, sont les sols les plus répandus à La Réunion. Ces sols se sont développés sur les cendres volcaniques du Piton des Neiges et de La Fournaise, au-delà de 700 m à l'Ouest et dès le niveau de la mer à l'Est. Très riches en verre volcaniques, ces cendres s'altèrent pour former des minéraux alumino-silicatés amorphes : les allophanes et l'imogolite. On y retrouve également des hydroxydes de fer (goethite, ferrihydrite) et d'alumine (gibbsite) présente en grande quantité. Les andosols sont également très riches en matière organique, qui se complexe avec les allophanes.

Ces 93 unités ont été regroupées en 2002 (Pouzet, 2002) à partir de leurs caractéristiques chimiques en domaines pédogénétiques, codifiés à partir des normes STIPA (1982) adaptées aux sols tropicaux, et traduites en grands types de sols : andiques non perhydratés, andiques perhydratés, bruns andiques, bruns, ferralitiques et vertiques (Figure 2.10b).

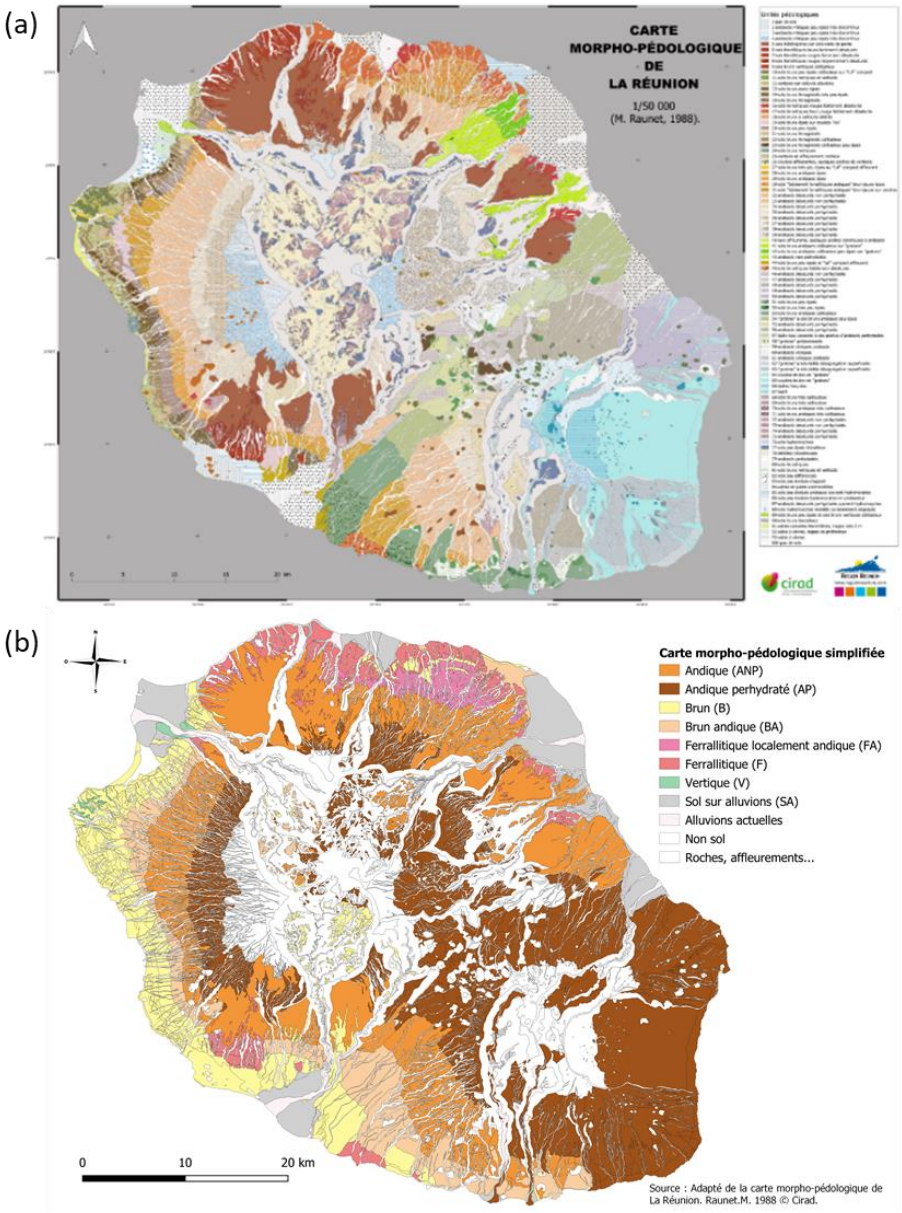


FIGURE 2.10 : CARTE MORPHO-PEDOLOGIQUE DE LA REUNION (RAUNET, 1991) (A) ET CARTE DES SOLS SIMPLIFIEE (POUZET, 2002) (B)

2.1.2.2 Une minéralogie étudiée

Les premiers travaux sur la minéralogie des sols sont ceux de Zebrowski (1975) sur une climato-séquence du versant Ouest du massif du Piton des Neiges. Les travaux de Gense (1976) ont étudié la minéralogie de plusieurs topo-séquences dans l'île. On peut résumer les séquences minéralogiques sur le versant Est : allophanes > halloysite > métahalloysite et sur le versant Ouest : allophanes > halloysite > métahalloysite > smectites. Les travaux de Rosello (1984) décrivent une séquence minéralogique générale, déjà présentée par Gense (1976) : des composés amorphes (allophanes/imogolites) dans les Andosols, de l'halloysite en milieu de séquence et de la metahalloysite dans les bas de versants tandis que la gibbsite est présente de l'amont à l'aval. Le fer se trouve à l'état amorphe à l'amont et cristallisé en goethite vers le bas. D'autres travaux sur la minéralogie des sols ont été également menés à la fin des années 80 (Denaix, 1989; Vaksmann, 1987) et sont résumés dans la thèse de Perret (1992) et suivent toujours la même séquence minéralogique générale (Figure 2.11).

	Séquence ouest :					Séquence sud :		
Minéraux : Altitude (m) :	**380**	**620**	**780**	**1000**	**1230**	**500**	**700**	**900**
Gibbsite	*	**	**	**	**	**	**	**
Halloysite - Métahalloysite	*	**	**	*	o	*	*	*
Amorphes	*	*	*	**	**	*	**	**
Imogolite	?	*	?	**	**	*		
Kaolinite	**			*	o			
Magnétite - Maghémite		*	*	*	*			*
Ilménite	*	*	*	*	*			
Ferrihydrite		*						
Hématite	*		*	*		*	*	*
Goethite alumineuse		*		*		*	*	*
Smectites	*			?				
Opale						*		
Amphibole						*		
Cristobalite						*		
Lépidocrocite - Bohémite	?							

FIGURE 2.11 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES SEQUENCES DE SOLS ETUDIEES (HORIZONS SA DES ANDOSOLS ET B DES SOLS BRUNIFIES), [O : ABSENCE, ? : INCERTITUDE, * : PRESENCE, ** : ABONDANCE], EXTRAIT DE PERRET (1992)

En 2018, une centaine d'échantillons géoréférencés de sols agricoles (0-30 cm de profondeur) ont fait l'objet d'une analyse aux rayons X et ont permis de spatialiser plus précisément l'information minéralogique (Figure 2.12).

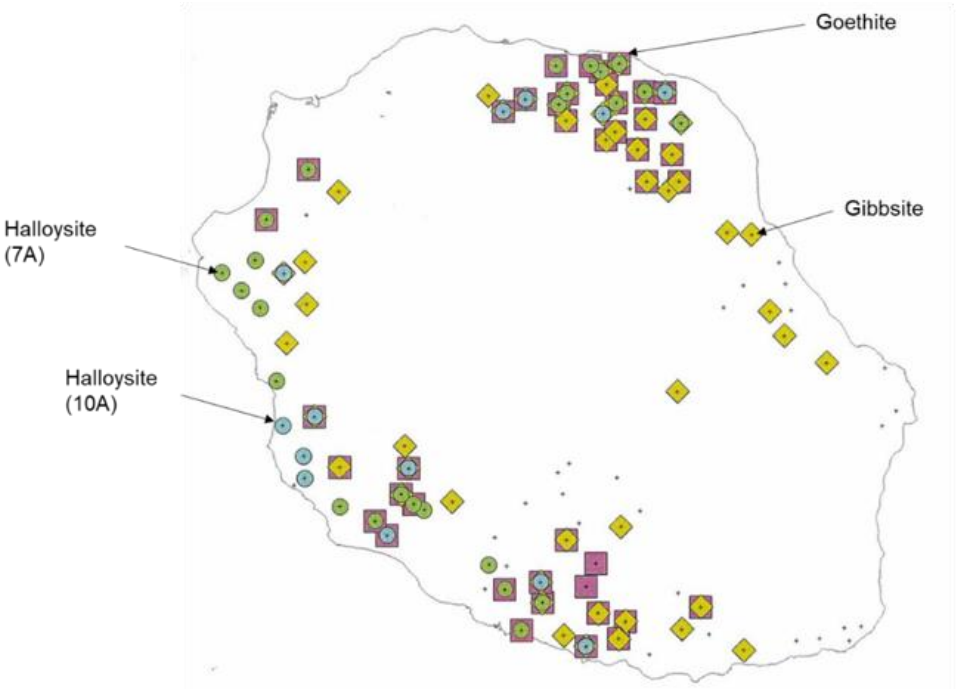


FIGURE 2.12 : CARTOGRAPHIE SIMPLIFIEE DES ANALYSES RX REALISEES EN 2018

Les échantillons d'Andosols sont représentés par des points, et se retrouvent majoritairement sur le massif du Piton de La Fournaise, de la gibbsite est parfois associée aux minéraux amorphes. La Goethite est présente dans la majorité des échantillons. L'Halloysite est présente en bas de versant sous une forme déshydratée (7Å) et hydratée (10Å).

2.1.3 Les sols agricoles

Cette étude se concentre sur les sols agricoles de La Réunion. Les surfaces agricoles sont majoritairement localisées dans les Bas de versants et dans les plaines d'altitude entre les deux volcans (Figure 2.13).

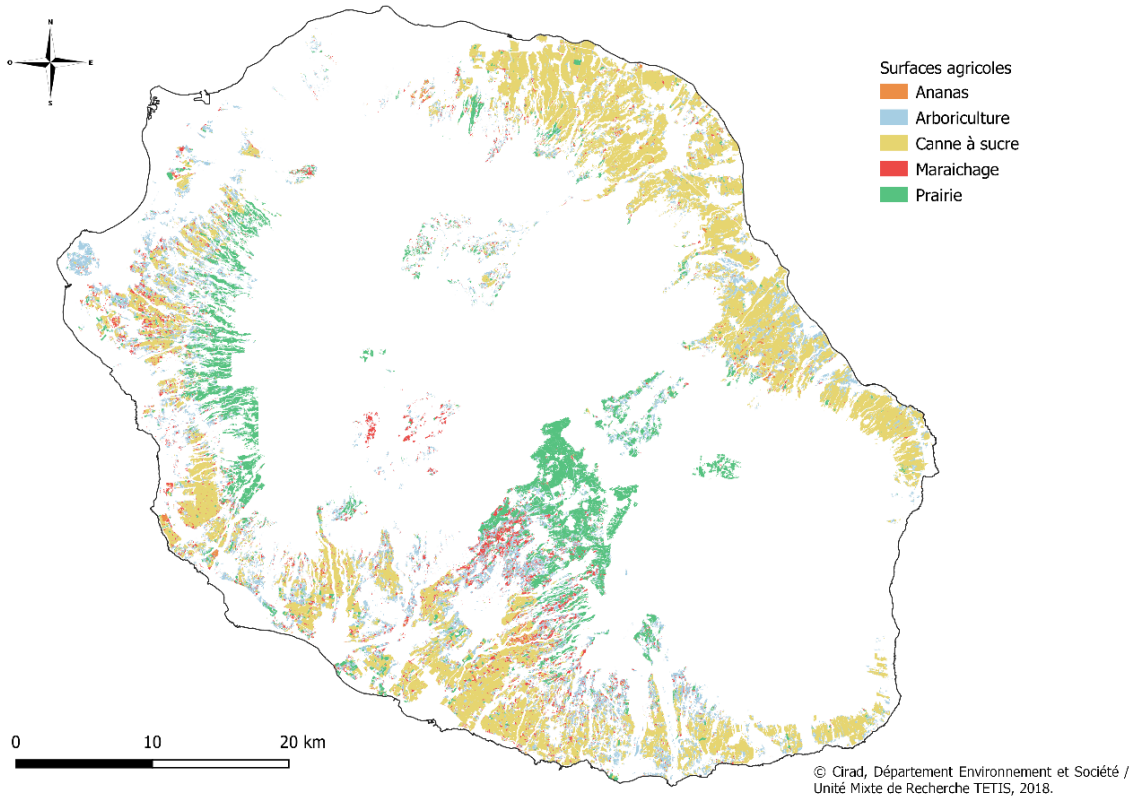


FIGURE 2.13 : CARTE DES SURFACES AGRICOLES DE LA REUNION

Plusieurs données spatialisées sont disponibles pour les surfaces agricoles : les surfaces agricoles déclarées (RPG), les surfaces déclarées complétées (DAAF). Cependant, nous utiliserons dans la suite de cette étude les surfaces issues de la carte d'occupation du sol 2017 produite par le CIRAD à partir d'images satellites à très haute résolution spatiale Spot6/7 qui a permis d'identifier les surfaces agricoles selon les grands types d'usage définis pour les besoins de cette étude et qui se répartissent comme suit : canne à sucre (51% de la surface agricole), l'arboriculture (22%), la prairie (19%), le maraichage (7%) et l'ananas (1%) (Figure 2.14a) (Dupuy, 2018). A La Réunion, la canne à sucre est cultivée depuis plus de 2 siècles et représente aujourd'hui encore plus de 50% de la surface agricole de La Réunion (DAAF). Elle est également cultivée selon des pratiques conservatrices vis-à-vis du carbone : tous les résidus de culture sont laissés au sol après la récolte permettant une couverture permanente du sol, aucun brûlis n'est pratiqué. Le travail du sol se faisant uniquement à la replantation, il ne se pratique que tous 7 à 10 ans.

D'autre part, une intersection de la carte des surfaces agricoles avec la carte morpho-pédologique simplifiée (Pouzet, 2002), permet de montrer que les surfaces agricoles sont majoritairement présentes sur sols andiques et sur sols bruns, qui représentent 70% des sols agricoles (Figure 2.14b).

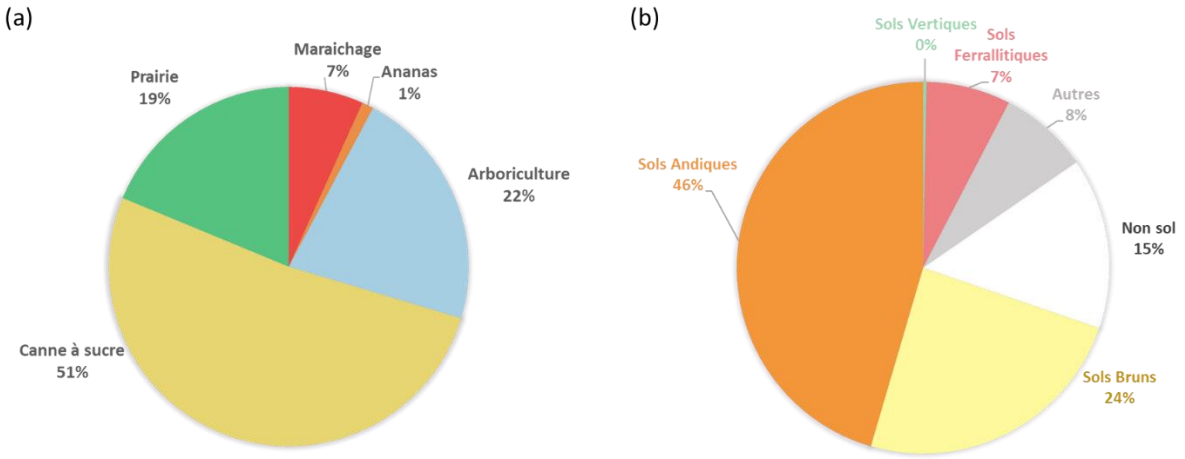


FIGURE 2.14 : REPARTITION DES SURFACES AGRICOLES PAR USAGE (A) ET PAR TYPE DE SOL (B)

2.2 Matériel : Analyses de sols géoréférencées sur le territoire réunionnais

2.2.1 Base d'analyses de sol de La Réunion

La base de données d'analyses des sols du CIRAD de la Réunion (Figure 2.15) contient 46000 échantillons géoréférencés de sols prélevés entre 1993 et 2017 dans différents systèmes de culture. Cependant, la majorité (80%) des sols analysés proviennent de parcelles de canne à sucre. Ce grand nombre d'analyses de sols sous canne à sucre est la conséquence de l'apparition du plan de soutien de l'Etat à la replantation de la canne dans les années 90. En effet, pour obtenir ces subventions, les planteurs doivent déclarer et localiser la, ou les, parcelle(s) à replanter (contour GPS, informations techniques et administratives). Une analyse de sol de la parcelle à replanter est également obligatoire. Le prélèvement est fait par un technicien du Centre Technique Interprofessionnel de la Canne et du Sucre (CTICS) et envoyé au laboratoire du CIRAD accrédité ISO17025.

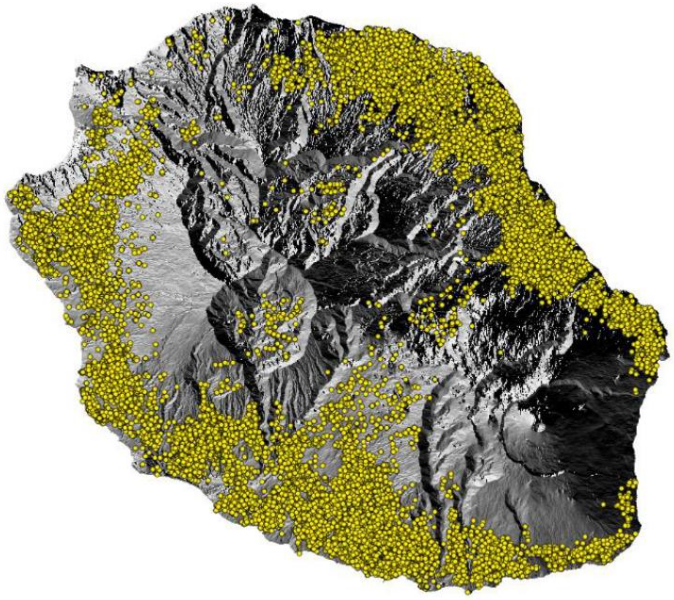


FIGURE 2.15 : LOCALISATION DES ECHANTILLONS DE SOLS PRELEVES ENTRE 1993 ET 2017 A LA REUNION

Les prélèvements des échantillons de sol issus des parcelles agricoles étant majoritairement réalisées pour des besoins administratifs et/ou pour un conseil en fertilisation, la majorité des prélèvements de sols correspondent à l'horizon travaillé du sol (0-30 cm).

D'autre part, l'un des objectifs de cette étude étant d'évaluer les effets des changements d'usages des sols agricoles sur les stocks de carbone organique du sol, ces différents systèmes de culture ont été regroupés en 5 types d'usages dont les pratiques ont été estimées similaires du point de vue de leur impact sur le stockage du carbone : canne à sucre (CAN), prairie (PRA), maraichage de cycle long (ananas (ANA)), maraichage de cycle court (maraichage (MAR)), et arboriculture (ARB). Une analyse du nombre d'échantillons analysés chaque année montre de fortes variations du nombre d'échantillons analysés d'une année à l'autre (Figure 2.16Figure 2.17), dues aux fluctuations du nombre de parcelles de canne à sucre replantées d'une année à l'autre suite à des évènements climatiques extrêmes (sécheresse, cyclones, etc…). Cet effet se répercute sur la représentativité des types de sols selon les années (Figure 2.17).

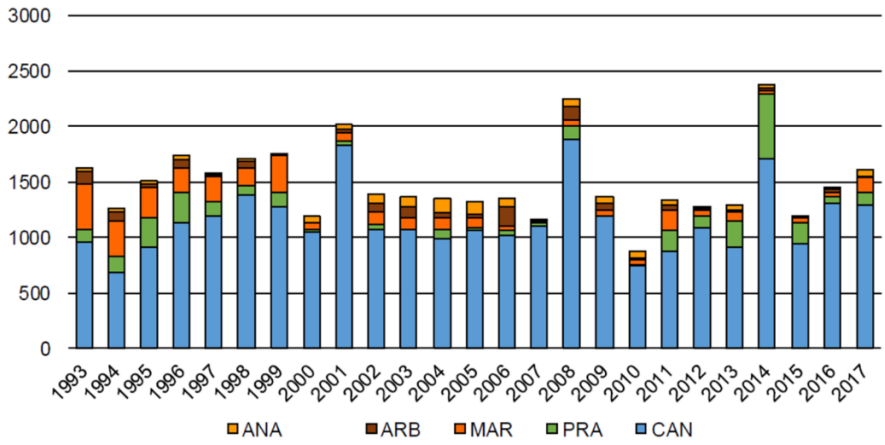


FIGURE 2.16 : NOMBRE D'ECHANTILLONS DE SOL PRELEVES PAR ANNEE ET PAR CULTURE

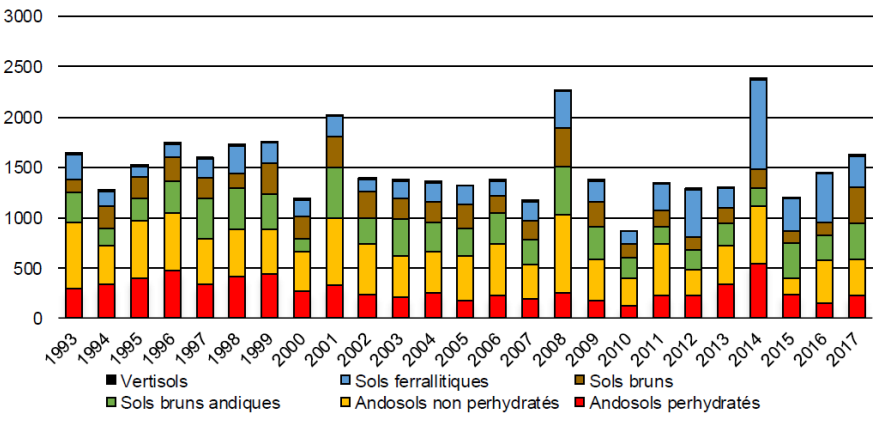


FIGURE 2.17 : NOMBRE D'ECHANTILLONS DE SOL PRELEVES PAR ANNEE ET PAR TYPE DE SOL (POUZET, 2002)

Dans cette base de données, nous avons retenu les variables des analyses de sol (C , CEC, Ca, K, Mg, N, Na, P, pH, pHKCl) et des variables descriptives des échantillons de sol (date de prélèvement, de l'analyse, profondeur de sol échantillonnée, coordonnées géographiques, altitude, culture précédente et actuelle, type de sol), toutes ces données sont listées dans la Figure 2.18.

CHRONO	Identifiant de l'échantillon
DATEARR	Date d'arrivée au laboratoire
EXPNOM	Nom de l'exploitant
EXPPREN	Prénom de l'exploitant
X_rgr92	Coordonnées X en UTM RGR92_Zone_40S (m)
Y_rgr92	Coordonnées Y en UTM RGR92_Zone_40S (m)
GEOALTIT	Altitude (m)
SOLCULTAV	Culture actuelle
SOLCULTPR	Culture précédente
SOLPROF	Profondeur de prélèvement (cm)
SOLTYPE	Code STIPA
C_ANNE	Carbone organique méthode Anne (g/100g de MS)
C_DUMAS	Carbone total méthode Dumas (g/100g de MS)
CA_ECH	Calcium échangeable (mé/100g de MS)
CEC	Cation échangeable Capacity (mé/100g de MS)
K_ECH	Potassium échangeable (mé/100g de MS)
MG_ECH	Magnésium échangeable (mé/100g de MS)
N_TOT	Azote Total (g/kg de MS)
NA_ECH	Sodium échangeable (mé/100g de MS)
P_ASS	Phosphore Assimilable (mg/kg de MS)
PH	pH de l'échantillon, brut ou en solution/suspension H2O
PH_KCL	pH du sol dans une solution de KCl 1N
COUPE_PAILLE	Export ou non de la paille de canne à sucre
SOLTYPE_SI	Type de sol simplifié à partir de SOLTYPE

FIGURE 2.18 : PRINCIPALES VARIABLES DESCRIPTIVES DES ANALYSES DE SOL DE LA BASE DE DONNEES

2.2.2 Jeux de données

2.2.2.1 Données de terrain et spectres proche et moyen infra-rouge

Le jeu de données correspondant aux prélèvements sur le terrain en 2016 contient 95 échantillons de sol de 10 cm d'épaisseur, capturant les grands types de sol de La Réunion (Figure 2.19; Tableau 2.1), et les deux principaux modes d'usages des sols agricoles de La Réunion, prairie et canne à sucre.

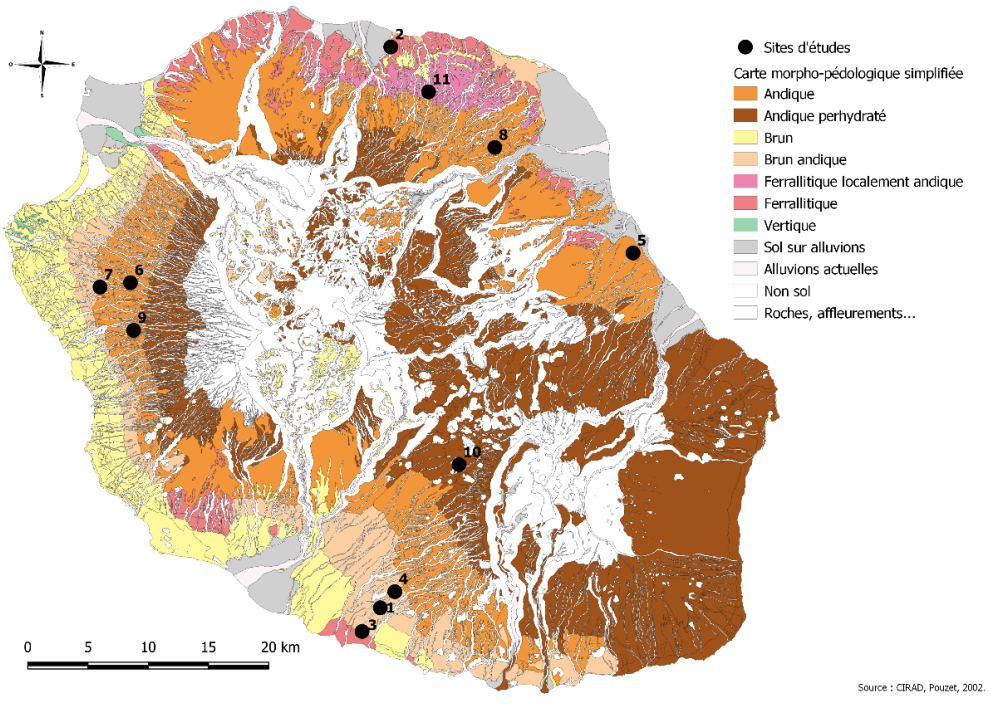


FIGURE 2.19 : LOCALISATION DES SITES DE PRELEVEMENT

Les prélèvements des carottes de sol ont été réalisés à l'aide de deux gouges de 50 cm et 1 m insérées dans le sol grâce à un carottier motorisé à percussion (Cobra TTe, AtlasCopco, Stockholm, Sweden) (Tableau 2.1 ; Figure 2.20).

TABLEAU 2.1 : DESCRIPTION DES SITES DE PRELEVEMENT

Site	Type de sol	Mode d'usage	Profondeur de prélèvement	Nombre de carottes prélevées (nb de répétitions)	Date du prélèvement	Durée de la culture	Altitude (m) de la parcelle
1	Brun	Canne à sucre	0-90	1	29/02/2016	5	325
2	Ferrallitique	Canne à sucre	0-40	1	02/03/2016	6	64
3	Brun	Canne à sucre	0-40	1	09/03/2016	10	99
4	Brun andique	Canne à sucre	0-40	1	16/03/2016	4.5	511
5	Andique	Canne à sucre	0-40	1	23/03/2016	5	39
6	Andique	Canne à sucre	0-40	1	30/03/2016	10	997
7	Brun	Canne à sucre	0-40	1	07/04/2016	4	722
8	Andique	Canne à sucre	0-90	3	13/04/2016	6	370
9	Andique	Prairie	0-80	3	19/04/2016	20	1124
10	Andique per.	Prairie	0-90	3	27/04/2016	16	1595
11	Ferrallitique and.	Canne à sucre	0-80	3	02/05/2016	10	346



FIGURE 2.20 : PRELEVEMENT D'UNE CAROTTE DE SOL SOUS CANNE A SUCRE EN 2016 : UTILISATION DU CAROTTIER MOTORISE A PERCUSSION POUR PRELEVER LA CAROTTE DE SOL (A) ET EXTRACTION DE LA CAROTTE DE SOL (GOUGE DE 1M) PAR UN DISPOSITIF DE LEVIER (B)

Des mesures de la teneur en carbone organique du sol, de la densité apparente et des éléments grossiers ont été réalisées sur l'ensemble de ces échantillons de sol. D'autre part, des spectres proche et moyen infrarouge, au laboratoire et in situ, ont été acquis sur l'ensemble de ces échantillons de sol. Les données analytiques et spectrales, issues des prélèvements de terrain, ont ainsi permis de

développer des modèles de calibration et de prédiction de la teneur en COS, de la densité apparente et du stock de COS, présentés sous forme d'un article publié dans la revue Catena dans le chapitre 3 de ce manuscrit (Tableau 2.2).

2.2.2.2 Données d'analyses de sol du laboratoire et spectres moyen infra-rouge

De la base de données du laboratoire du CIRAD contenant plus de 46 000 échantillons de sol, plusieurs jeux de données ont été sélectionnés selon les différents objectifs de cette thèse.

Un premier jeu de données a été utilisé pour l'exploration de la base de données en 2014 par Gogé (2014). La base de données d'analyses des sols de la Réunion ou LIMS (Laboratory Information Management System) contenait, au moment de cette fouille de données, 42 700 échantillons géoréférencés de sols, prélevés entre 1993 et 2013 dans différents systèmes de culture : canne à sucre, prairie, maraichage, fruitier… dont 80% des analyses proviennent de parcelles de canne à sucre. Une base de données de 7 949 analyses d'échantillons de sol (pour l'horizon 0-30 cm), sous canne à sucre (Figure 2.21 ; Tableau 2.2) a été extraite à partir de cette base d'analyses de sols du CIRAD de La Réunion par Gogé (2014) après inventaire, nettoyage, amélioration et complétion de la base. Dans ce travail de thèse, ce jeu de données a été utilisé pour explorer les déterminants du carbone autres que le mode d'usage puisque tous les échantillons de sol sélectionnés étaient des échantillons de sol sous canne à sucre. D'autre part, la datation et la localisation précises au sein d'îlots culturaux de ce jeu de données a permis d'explorer les teneurs en COS en fonction du temps (séries diachroniques de plus de 20 ans) et en fonction de leur localisation permettant ainsi de les analyser en fonction des différentes classifications de sol disponibles sur le territoire. Ces données et analyses sur les déterminants, la variabilité et la stabilité des teneurs en COS sont décrites dans la première partie du chapitre 4.

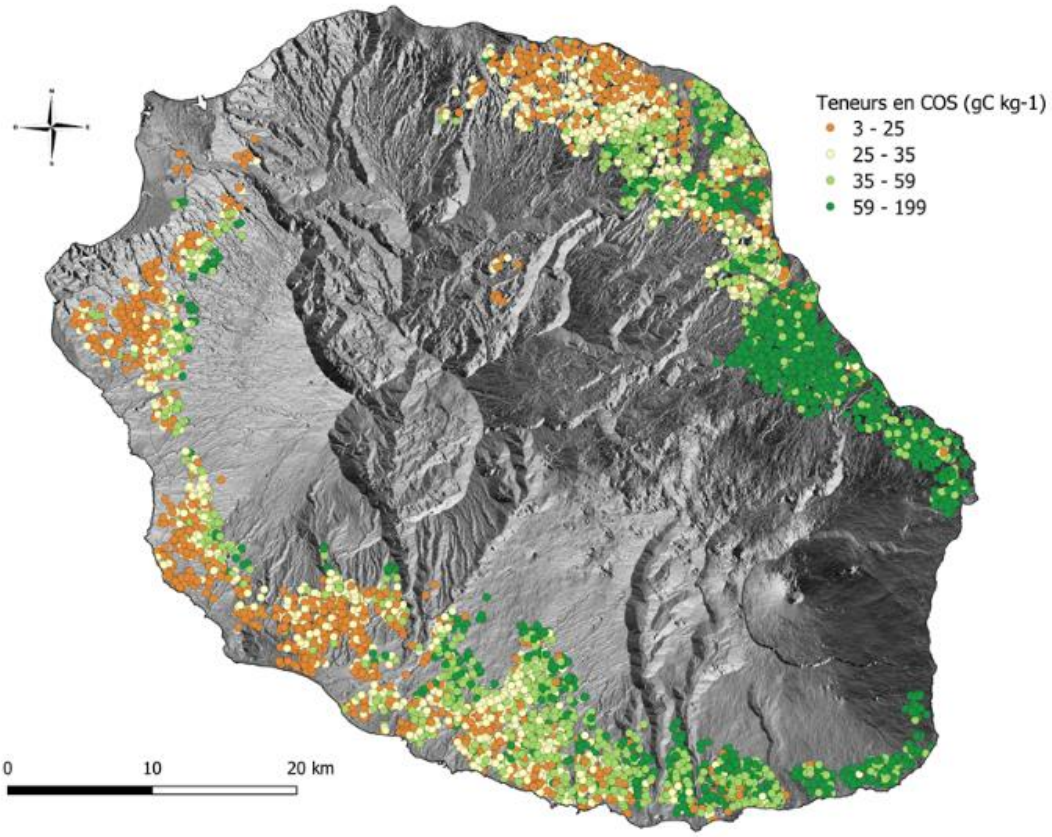


FIGURE 2.21 : CARTOGRAPHIE DES 7 949 ECHANTILLONS DE SOL SOUS CANNE A SUCRE

Un second jeu de données de 8742 échantillons de sol géoréférencés de profondeur 0-30 cm provenant de parcelles agricoles de différents usages réparties sur l'ensemble des surfaces cultivées de La Réunion ont été sélectionnés (Figure 2.22), après un nettoyage de la base de données d'analyses des sols de la Réunion de 1993 à 2017 (élimination des échantillons de sols correspondant à des expérimentations agronomiques, élimination des échantillons dont les coordonnées sont aberrantes ou ne correspondent pas à la bonne parcelle, échantillons de prélèvements profonds (>30 cm), etc…). Ce jeu de 8742 échantillons contient deux sous-jeux de données utilisés dans la suite de ce manuscrit. Le premier sous-jeu de données correspond à 962 analyses d'échantillons de sols, correspondant principalement à des parcelles de canne à sucre, et répartis sur l'ensemble des surfaces cultivées. Le second sous-jeu de données correspond aux autres 7780 analyses d'échantillons de sols du jeu de données (Tableau 2.2).

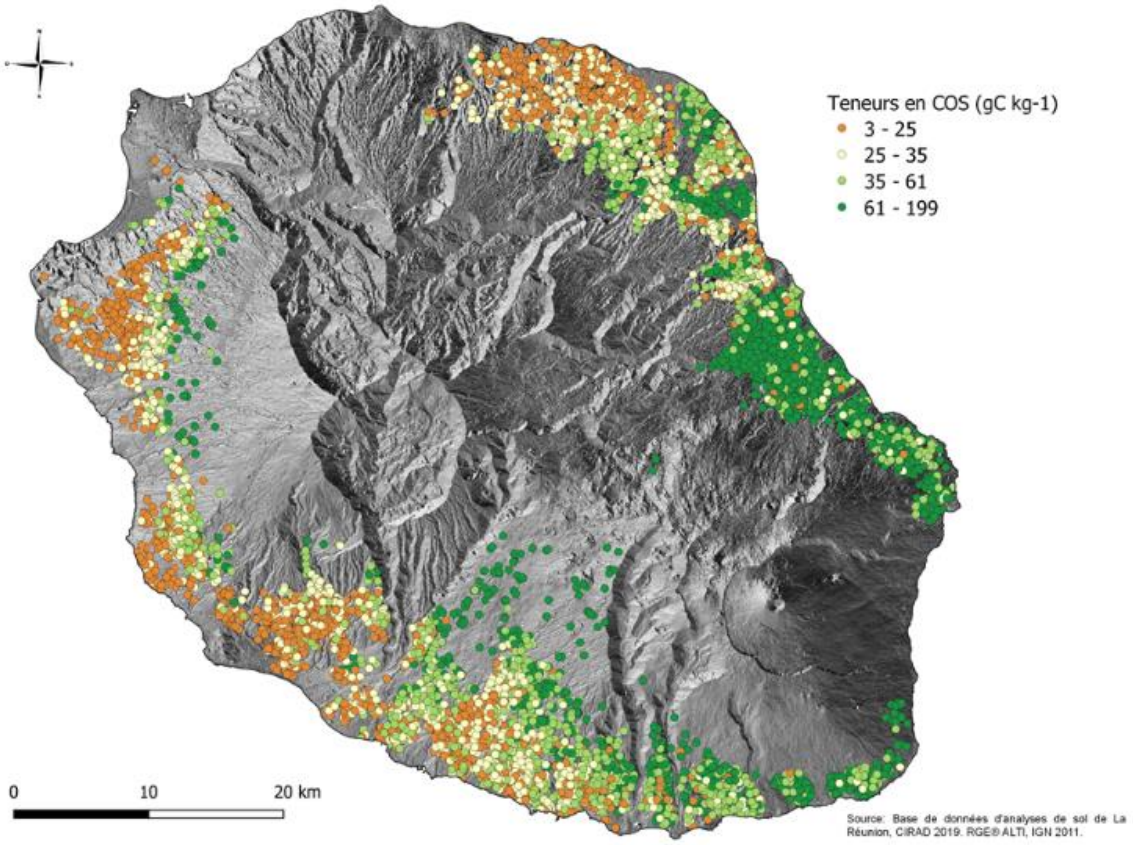


FIGURE 2.22 : CARTOGRAPHIE DES 8 742 ECHANTILLONS DE SOL

A partir des 962 analyses d'échantillons de sols sélectionnées, les 962 échantillons de sol correspondants ont été récupérés à la pédothèque du laboratoire du CIRAD puis broyés manuellement à 200 µm. 962 spectres MIR ont ensuite été acquis sur ces échantillons de sol avec pour objectif la classification non supervisée des échantillons de sol en différentes unités spatiales pédologiques grâce aux données spectrales MIR et à leur localisation sur l'ensemble des surfaces agricoles. Les résultats sont présentés dans la première partie du chapitre 4.

De manière plus générale, ces données spectrales (962 spectres MIR) ainsi que l'ensemble des 8 742 analyses de sol ont été utilisées dans la méthodologie de définition des unités spatiales pédologiques, de la quantification et de la spatialisation des stocks de COS ainsi que dans la méthodologie

d'évaluation des impacts des changements d'usages sur les stocks de COS dont les résultats sont présentés dans les chapitres 4 et 5.

Les différents jeux de données utilisés dans ce travail de thèse sont décrits dans le Tableau 2.2.

TABLEAU 2.2 : DESCRIPTION DES JEUX DE DONNEES DECRITS DANS LE MANUSCRIT

Type de données	Nombre d'échantillons ou d'analyses de sol	Objectifs	Numéro de Chapitre
Terrain	95	Méthodologie d'évaluation des stocks de COS* par spectroscopie infrarouge	3
Laboratoire	7949	Fouille de données et analyse spatiale	4
	962 +7780 (=8 742)	Définition d'unités spatiales pédologiques	4
		Evaluation des stocks de COS* et des variations de stocks de COS*	4-5

* COS : Carbone organique du sol

2.3 Méthodes

2.3.1 Méthodes de caractérisation des constituants des sols et des propriétés spectrales

2.3.1.1 Mesures et analyses de sol

Les échantillons de sol des prélèvements de terrain sont des sections de 10 cm de la carotte de sol à partir de l'horizon de surface. Les mesures des poids frais des échantillons de sol ont été réalisées directement sur le terrain. Toutes les autres mesures et la préparation des échantillons de sol ont été réalisées au laboratoire du CIRAD, à Saint-Pierre de La Réunion. Les échantillons de sol ont été séchés à l'air pendant 24h avant de séparer la terre fine des éléments grossiers par tamisage. Les éléments grossiers ont été pesés afin d'évaluer le taux d'éléments grossiers de l'échantillon. La terre fine a ensuite été séchée à 40°C pendant 24h supplémentaire. La densité apparente a été calculée comme le rapport de la masse de terre fine sèche (<2mm) et des éléments grossiers sur le volume total de l'échantillon de sol. La masse de terre fine sèche a été déterminée à partir d'aliquotes séchés à 105°C pendant 48 puis pesées afin d'estimer un taux d'humidité à appliquer au poids frais de terre fine.

Les analyses de sol ont été réalisées au laboratoire de la Bretagne du CIRAD à Saint-Denis de La Réunion. La teneur en carbone des échantillons a été déterminé par la méthode de combustion Dumas avec un analyseur Elementar VarioMax Cube. Les quantités de fer, d'aluminium et de silicium extraites par dissolutions sélectives à l'oxalate d'ammonium (Al_o, Fe_o, Si_o), au pyrophosphate de sodium (Al_p, Fe_p) et au CBD (citrate-bicarbonate-dithionite) (Al_c, Fe_c) ont été dosées par spectromètre à émission atomique (ICP-AES) au laboratoire du CIRAD à Montpellier sur les 95 échantillons de sols issus des prélèvements de terrain.

2.3.1.2 Acquisition de spectres proche et moyen infrarouge

Les spectres proche infrarouge (PIR) ont été acquis sur les échantillons de sol issus des prélèvements de terrain avec un spectroscope ASD LabSpec 5000 (Analytical Spectral Devices, Boulder, CO, USA), soit directement sur le sol frais directement sur la carotte de sol sur le terrain (Figure 2.23a), soit sur la terre fine séchée, tamisée à 2 mm au laboratoire (Figure 2.23b).

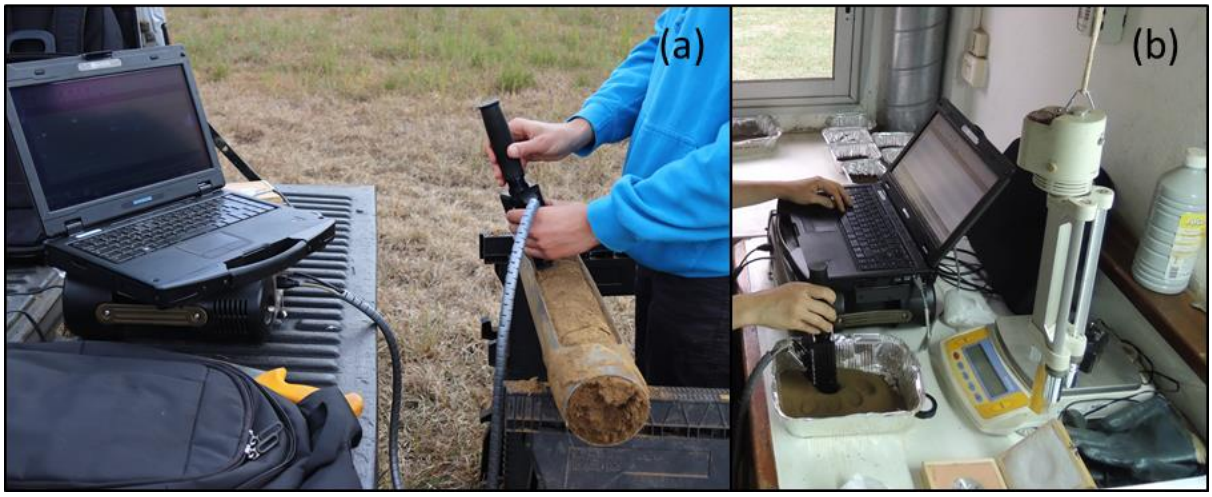


FIGURE 2.23 : ACQUISITION DE SPECTRES PIR DIRECTEMENT SUR LA CAROTTE DE SOL SUR LE TERRAIN (A) ET AU LABORATOIRE SUR ECHANTILLON SECHE, TAMISE A 2 MM (B)

Sur le terrain, 30 spectres ont été acquis pour chaque échantillon de sol puis moyennés. Au laboratoire, 3 acquisitions spectrales ont été réalisées par échantillon de sol séché et tamisé à 2mm puis moyennés. Chaque spectre PIR est la moyenne de 100 spectres internes acquis en réflectance sur une gamme de longueur d'ondes comprises entre 350 et 2500 nm, avec un intervalle de mesure de 1 nm. Un spectre de référence (Spectralon, i.e. polytetrafluoroethylene) est effectué toutes les 30 minutes. Les données spectrales acquises en réflectance sont ensuite transformées en absorbance (absorbance = log(1/réflectance)).

Les spectres moyen infrarouge (MIR) ont été acquis sur les 95 échantillons de sol issus des prélèvements de terrain et sur 962 échantillons de sol issus de la pédothèque du laboratoire du CIRAD avec un spectromètre FTIR portatif Agilent 4300 (Agilent technologies, Santa Clara, CA). Les acquisitions de spectres MIR ont été réalisées sur des échantillons de sol séchés, tamisés et broyés à 200µm au laboratoire (Figure 2.24). Chaque spectre est la moyenne de 120 spectres internes acquis en absorbance sur une gamme de nombre d'ondes entre 700 et 4000 cm^{-1}, avec un intervalle de mesure de 4 cm^{-1}. Un spectre de référence (référence « Argent ») est effectué toutes les 30 minutes.

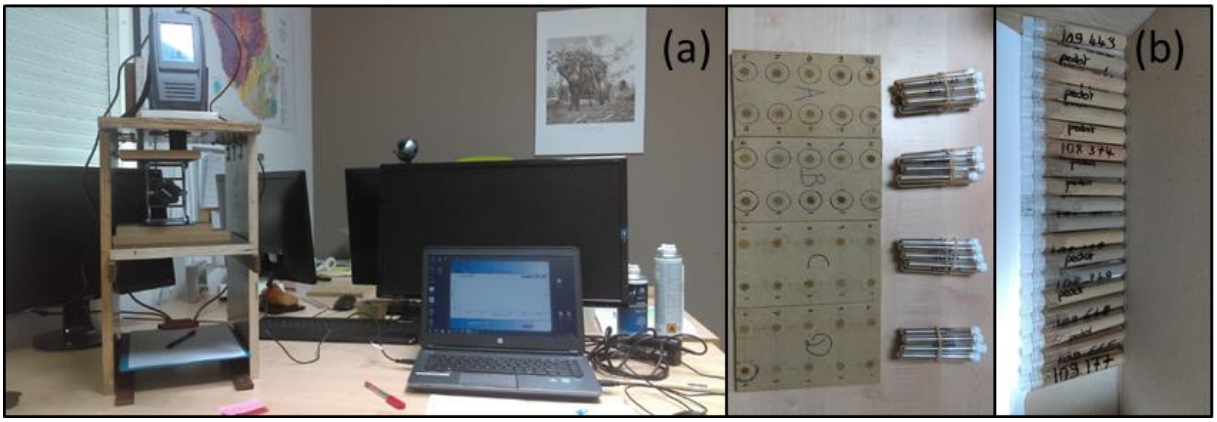


FIGURE 2.24 : SPECTROMETRE FTIR PORTATIF AGILENT 4300 UTILISE POUR L'ACQUISITION DE SPECTRES MIR AU LABORATOIRE (A) SUR ECHANTILLON SECHE, TAMISE ET BROYE A 200 µM (B)

2.3.2 Analyses des données

2.3.2.1 Outils de fouille de données

2.3.2.1.1 Boosted regression trees

La méthode des arbres de régression boostés (Boosted Regression Trees BRT) a été utilisée sur les 7949 échantillons de sols avec le package 'dismo' (Hijmans et al., 2017) du logiciel R pour prédire la teneur en carbone du sol. La méthode BRT est utilisée pour améliorer la précision de prédiction grâce à la procédure boostée qui construit, itérativement, un ensemble d'arbres simples et les combinent. Le nombre d'arbres (ou nombre d'itérations) optimal est évalué directement par la fonction. A chaque itération, une fraction du jeu de données (nommé bag fraction avec une valeur fixée à 0.5) est tirée aléatoirement pour créer un arbre. Les échantillons « out-of-bag » sont ensuite utilisés pour une validation croisée. Les autres paramètres de cette méthode sont « learning rate », « tree complexity » et ont été fixés à 5 et 0.01, respectivement. Les avantages de cette méthode sont que les prédicteurs, potentiels déterminant de la variable à prédire, peuvent être hiérarchisés en calculant un indice d'importance dans le modèle.

L'objectif est d'identifier et hiérarchiser les déterminants du carbone organique du sol à partir de prédicteurs tels que des propriétés chimiques du sol (CEC, pH, pHKCl, Ca, Mg, K, Na), des co-variables liées aux sols et à leur pédogenèse (typologie de sol, altitude, pente, précipitation moyenne annuelle (Pluie), température moyenne annuelle (Temp.) et rayonnement moyen annuel (Ray.) et des co-variables liées aux pratiques culturales de la canne à sucre (mode d'irrigation (Mode irr.), de coupe (Mode coupe) et de chargement (Mode charg.) et la culture précédente (Culture pr.)).

2.3.2.1.2 Random forest

Afin de délimiter plus finement les contours géographiques des groupes de sol issus de la classification k-medoids (méthode décrite çi-après) des 962 échantillons de sol, nous avons augmenté la densité de points en recrutant les autres échantillons de la base de données d'analyses de sol. Nous avons prédit un groupe de sol pour chacun de ces échantillons via une classification supervisée par apprentissage automatique utilisant l'algorithme Random Forest (Liaw and Wiener, 2002) à l'aide du logiciel R. La base d'apprentissage a été constituée par les 962 échantillons classés en 9 groupes par l'algorithme k-medoids. Les prédicteurs ont été sélectionnés par expertise en fonction de leur rôle dans la pédogenèse : 2 variables qualitatives (âge et type des matériaux parentaux géologiques et nombre de mois peu pluvieux) et 10 variables quantitatives (C, N, pH, pHKCl, CEC, et somme des bases, altitude et pente, pluie médiane annuelle et température moyenne annuelle).

2.3.2.2 Chimiométrie

La « chimiométrie » est la science qui met en relation des mesures (spectres IR) faites sur un système chimique ou un procédé avec l'état de ce système (analyses de sols, par exemple teneur en carbone, …) en utilisant des méthodes mathématiques ou statistiques. Les pré-traitements sont des méthodes de chimiométrie, mais d'autres méthodes permettent d'analyser les données : des méthodes non supervisées où seuls les spectres IR sont analysés, et des méthodes supervisées où les données spectrales sont mises en relation avec des données d'état du système étudié. L'objectif des méthodes non supervisées est de comprendre la structure des données spectrales tandis que l'objectif des méthodes supervisées est de prédire l'état du système à partir des spectres IR (Boulet and Roger, 2016). Dans cette étude, deux types de méthodes ont été utilisées : une méthode de régression PLS

(supervisée) afin de prédire les teneurs et stocks de carbone organique du sol ainsi que la densité apparente et les constituants amorphes de sols, et une méthode de classification (non supervisée) pour classer des types de sol à partir des données spectrales uniquement.

2.3.2.2.1 Prétraitements des spectres infrarouge

Les conditions idéales de la spectrométrie correspondent à une mesure d'une solution transparente et peu concentrée, que l'on peut avoir en laboratoire avec des échantillons préparés. La concentration du composé dans l'échantillon est alors directement relié à son absorbance selon la loi de Beer-Lambert qui stipule que l'absorbance (A) d'un composé à la longueur d'onde (λ) est proportionnelle à la concentration du composé (C), à la longueur du trajet de la lumière pour traverser l'échantillon (L) et au coefficient d'extinction (ε) du composé à la longueur d'onde (λ) :

$$A(\lambda) = C * L * \varepsilon(\lambda)$$

Cette loi s'applique pour les différentes valeurs de λ du spectre infra-rouge ($700 < \lambda < 25000$ nm). La concentration du composé est alors fonction de l'absorbance à la longueur d'onde λ.

Pour chaque longueur d'onde, la part du rayonnement réfléchi « $I_R(\lambda)$ » par l'échantillon et mesuré par le spectromètre et convertie en absorbance A(λ) (=log (1/ $I_R(\lambda)$). L'ensemble de ces absorbances constitue le spectre de l'échantillon (Roger and Ecarnot, 2016).

Le sol est un mélange de minéraux et de matières organiques avec une structure physique composée d'agrégats et d'espaces poreux contenant de l'eau et de l'air. Le sol est donc un milieu hautement absorbant avec une forte diffusion de la lumière. La loi de Beer-Lambert n'est donc pas satisfaite dans un tel milieu (Gobrecht et al., 2014). La spectroscopie infrarouge n'est donc jamais utilisée dans les conditions optimales de la loi de Beer-Lambert et la relation entre le spectre et la concentration d'un composé dans un échantillon est plus compliquée. En effet, le spectre est déformé par d'autres phénomènes. Les pré-traitements des spectres peuvent permettre d'éliminer ces phénomènes afin de se rapprocher de la loi de Beer-Lambert pour un composé donné.

Dans un échantillon idéal, les photons de la lumière traversent l'échantillon en ligne droite, la mesure de l'intensité lumineuse en entrée et en sortie permet de calculer l'absorbance du composé. Par contre, dans un échantillon de sol, la lumière ne suit plus un trajet en ligne droite et le spectre est perturbé par la diffusion des photons et le bruit de mesure. La diffusion des photons entraine une augmentation du trajet de la lumière (effet multiplicatif), et certains photons ne sont pas captés par le spectromètre (effet additif). De plus, des phénomènes aléatoires affectent la précision de la mesure, c'est le bruit de mesure (autre effet additif).

De manière générale, les prétraitements permettent de réduire ces effets parasites sur le spectre : des méthodes de lissage du spectre permettent d'enlever le bruit de mesure, des méthodes permettant d'enlever une ligne de base (baseline, detrend, continuum removal, dérivées première ou seconde) permettent de réduire l'effet additif dû à la perte d'intensité de la diffusion de la lumière lorsque certains photons ne sont pas captés par le spectromètre, et enfin des méthodes de logarithme ou de normalisation (SNV) permettent d'enlever l'effet multiplicatif (Roger and Ecarnot, 2016). Les prétraitements des spectres infrarouges ont été réalisés avec le logiciel The Unscrambler X 10.5 Software (CAMO Software Inc., Oslo, Norway).

2.3.2.2.2 PLSR

La régression selon les moindres carrés partiels (PLSR) est l'une des méthodes les plus couramment employées en science du sol (Genot et al., 2014; Viscarra Rossel et al., 2006). La régression PLS permet de relier un ensemble de variables dépendantes Y (par exemple la teneur en COS), à un ensemble de variables indépendantes X (spectres IR), lorsque le nombre des variables (indépendantes et dépendantes) est élevé. La PLS est basée sur la modélisation simultanée de la variabilité dans les matrices prédictive, X, et dépendante, Y, en calculant des Variables Latentes (LVs) qui maximisent la variance extraite des 2 matrices en même temps que leur corrélation. Un modèle d'étalonnage est d'abord construit afin de mettre en relation la variable à prédire, pour laquelle des analyses en laboratoire ont été faites et sont connues (par exemple la teneur en COS), et les spectres correspondants à ces échantillons de sol. Ce modèle, une fois validé (par validation croisée ou externe), permettra ensuite de prédire la variable (la teneur en COS) à partir de nouveaux spectres pour lesquels aucune analyse en laboratoire n'a été faite, dans la gamme de valeurs du modèle de prédiction. Les modèles de prédiction des stocks de COS ont été réalisés avec le logiciel The Unscrambler X 10.5 Software (CAMO Software Inc., Oslo, Norway).

2.3.2.2.3 Partitionnement par k-medoids

La classification non supervisée des échantillons de sol à partir de leur signature spectrale se fonde sur le postulat suivant : des spectres proches sont associés à des échantillons de sol chimiquement et minéralogiquement proches. Par conséquent, classer des spectres selon la proximité de leur signature spectrale équivaut à obtenir des groupes d'échantillons ayant des propriétés chimique et minéralogique homogènes. Dans cette étude, la spectroscopie MIR a été utilisée dans le but d'établir une classification non supervisée des sols, uniquement à partir des signatures spectrales des échantillons de sol. L'objectif est de séparer les échantillons de sol selon les différences minéralogique et chimique contenues dans la signature spectrale des échantillons et cela de manière objective. Plusieurs méthodes de classification (classification ascendante hiérarchique), de partitionnement (k-means, k-medoids, fuzzy k-means, fuzzy k-medoids, réseau de neurones de type Self-Organising Maps) sur les spectres prétraités ou leurs cinq premières composantes principales issues de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) ont été testées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2019) afin d'identifier la méthode la plus adaptée pour classifier les sols de La Réunion. Pour chaque méthode de classification, nous avons fait varier le nombre de classes de 2 à 20. Cependant, aucune valeur optimale n'apparaissait quelle que soit la méthode de classification utilisée. Ce résultat semble être dû aux données spectrales elles-mêmes dont l'information minéralogique et organique qu'elles contiennent suivent un gradient lié à la pédogenèse des sols réunionnais, rendant difficile la séparation des spectres en groupes distincts. La méthode de classification non supervisée par partitionnement k-medoids sur les spectres MIR prétraités a finalement été appliquée avec le package 'cluster' du logiciel R (Maechler et al., 2019). Simple et robuste, cet algorithme permet de former des groupes homogènes (les échantillons sont aussi semblables que possible au sein d'un groupe) et différenciés (les groupes sont aussi dissemblables entre eux que possible) dont les centres de groupes sont des échantillons appartenant au jeu de données.

2.3.2.3 Spatialisation et systèmes d'information géographique

Le logiciel QGIS 3.8 open source QGIS 3.8 (QGIS Development Team, 2019) a été utilisé pour gérer, traiter l'information spatiale, et la représenter sous forme cartographique. Nous avons également eu recours à des polygones de Voronoï pour transformer l'information ponctuelle de groupe de sol sous forme de polygones et ainsi délimiter les contours géographiques d'unités pédologiques. La

géolocalisation des échantillons permet de définir des cellules de Voronoï qui partitionnent le territoire en autant de polygones qu'il y a d'échantillons de sol. Chaque polygone est défini tel que chaque point à l'intérieur du polygone est plus proche de l'échantillon se situant à l'intérieur du polygone que des autres échantillons. Cette méthode a été appliquée aux 8742 échantillons de sol géoréférencés de la base d'analyses de sol avec le logiciel open source QGIS 3.8 (QGIS Development Team, 2019).

2.3.2.4 Calculateur EX-ACT

Selon les lignes directrices du GIEC (IPCC, 2006), l'inventaire des GES pour le secteur de l'agriculture, la foresterie et autres affectations des terres (AFAT) est réalisé selon trois niveaux (Tier) de comptabilité carbone. Le Tier 1 correspond à une approche très générale, avec des facteurs d'émissions moyens fournis pour les grandes régions du monde définies par le GIEC. L'approche Tier 2 consiste à fournir des données d'activités et des facteurs d'émissions plus précis, à l'échelle des pays voire des régions. Enfin, l'approche Tier 3, plus détaillée inclut la modélisation biophysique des phénomènes à l'origine des émissions de GES. Ces modèles sont disponibles actuellement que pour un nombre très limité de sources d'émissions et de zones pédoclimatiques (V. Colomb et al., 2012).

D'un point de vue méthodologique, l'évaluation des émissions de CO_2 (issues d'une combustion), de N_2O et de CH_4, selon les approches génériques du GIEC (Tier 1 et Tier 2) sont basées sur la multiplication d'une donnée d'activité par un facteur d'émission spécifique pour un gaz et une source donnés. Pour les sources et les puits de CO_2 non énergétiques, le GIEC préconise une approche par bilan de masse c'est-à-dire une évaluation de la variation des stocks de carbone au cours du temps dans cinq compartiments : biomasse aérienne, biomasse souterraine, litière, bois mort et sol (Colomb et al., 2013b).

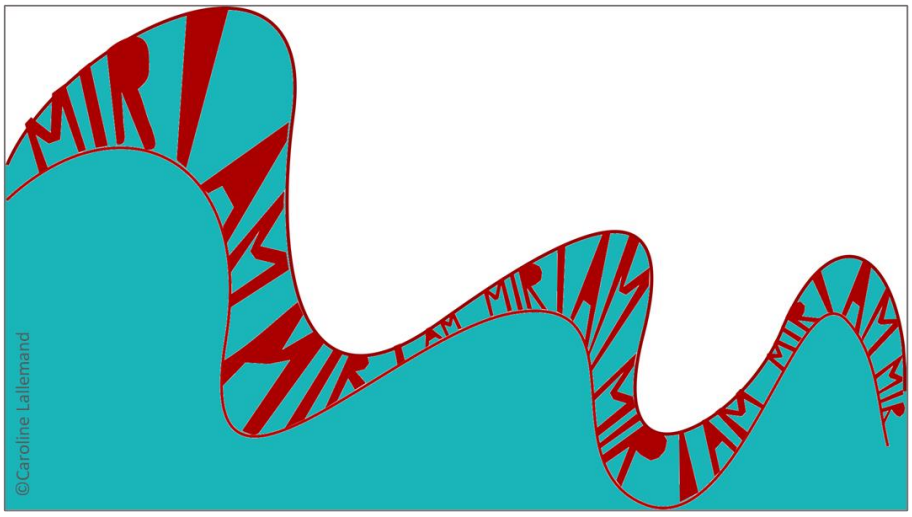
A l'échelle territoriale, les principaux enjeux concernant l'évaluation des émissions de GES sont la prise en compte de l'hétérogénéité des systèmes de production et la variabilité des processus biologiques impliqués dans les émissions de GES. Or, pour cela de nombreuses données (spatialisées) sont nécessaires : les données techniques des systèmes de production peuvent être obtenues à partir de base de données ou à dire d'expert mais cela augmente les incertitudes ; les processus biologiques à l'origine des émissions sont pris en compte dans les calculateurs en utilisant soit des modèles biophysiques, éventuellement liés à des données spatialisées, soit des facteurs d'émissions moyens fournis par le GIEC ou des études nationales. D'autre part, la prise en compte de la dynamique temporelle est particulièrement importante pour évaluer les effets des changements de stocks de carbone du sol et dans la biomasse, dont les émissions de CO_2 sont liées aux pratiques culturales et aux modes d'usage des terres. Pour répondre aux enjeux de l'évaluation des émissions de GES à l'échelle territoriale, des facteurs d'émissions précis doivent être établis pour l'ensemble des conditions pédoclimatiques et pour les processus biologiques (V. Colomb et al., 2012).

De nombreux outils d'évaluation des émissions de GES pour le secteur de l'agriculture, de la foresterie, et autres affectations des terres (AFAT) ont été développés. Parmi ces outils, on retrouve des calculateurs, c'est-à-dire des outils de calculs en ligne, ou sous Excel ou sous un autre format informatique qui permettent d'évaluer les émissions du secteur agricole et forestier. Ces calculateurs sont des outils « faciles d'utilisation » mais ont des approches et des objectifs différents, ainsi qu'un périmètre géographique défini (V. Colomb et al., 2012). Plusieurs outils étant disponibles, le choix du calculateur doit être raisonné en fonction de l'objectif de l'étude (impact des changements d'usages sur les bilans GES), du périmètre géographique (île tropicale volcanique), des paramètres à comptabiliser (cultures), du temps et les compétences nécessaires (Colomb et al., 2012). En raison de l'ensemble de ces critères, l'outil EX-ACT a été choisi pour sa facilité d'utilisation, son accès libre, pour

la possibilité de l'utiliser dans un contexte tropical. L'outil EX-ACT, conçu pour l'analyse de projet (ex : un changement d'usage ou de pratique), permet de comparer une situation en présence de projet avec une situation en absence de projet. Le calculateur EX-ACT permet également une évaluation rapide de l'impact GES d'un projet (positif, négatif ou neutre) et une identification des principaux postes d'émissions ou de stockage de carbone sur le territoire étudié. De plus, le calculateur EX-ACT est plus performant que les autres calculateurs pour évaluer les émissions de carbone dues aux sols et à la biomasse, et permet donc une meilleure évaluation des émissions de GES liés aux changements d'usages des sols (Colomb et al., 2013a).

Il a donc été choisi dans cette étude pour réaliser des bilans GES de scénarios de changements d'usages des terres agricoles à l'échelle de La Réunion. Il permet également de représenter la diversité pédologique, climatique et agronomique du territoire de La Réunion à travers la définition de la zone d'étude en fonction du type de sol et du climat, représentant chaque unité pédoclimatique issue de la stratification du territoire. De plus, sa structure simple permet à un utilisateur « expert » de s'appuyer sur des facteurs d'émissions de type Tier 2 bien que la contrepartie soit un travail de collecte de données et bibliographie important en amont (Colomb et al., 2013a).

CHAPITRE 3



CHAPITRE 3. PREDICTION DES STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE DES SOLS VOLCANIQUES TROPICAUX PAR SPECTROSCOPIE PROCHE ET MOYEN INFRAROUGE

En vue de répondre à la première question de recherche « Comment mesurer le stock de COS ? », une méthodologie d'évaluation de la teneur en COS, de la densité apparente et du stock de COS par spectroscopie proche et moyen infrarouge a été développée. Le Chapitre 3 présente la méthodologie de mesure du stock de COS par spectroscopie proche et moyen infrarouge sous la forme d'un article intitulé « Prediction of tropical volcanic soil organic carbon stocks by visible-near- and mid-infrared spectroscopy » et publié dans la revue CATENA.

Title:

PREDICTION OF TROPICAL VOLCANIC SOIL ORGANIC CARBON STOCKS BY VISIBLE-NEAR- AND MID-INFRARED SPECTROSCOPY

Author names and affiliations:

[1] CIRAD, UPR AIDA, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France. AIDA, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France. pierre.todoroff@cirad.fr

[2] ADEME, Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésillé,BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

[3] UMR Eco&Sols, IRD, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France. alain.albrecht@ird.fr

Auteur correspondant : Myriam Allo (myriam.allo@cirad.fr)

CIRAD, UPR AIDA, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France. AIDA, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

ADEME, Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésillé, BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

Résumé

L'évaluation des stocks de carbone organique du sol (COS) est une problématique méthodologique pour la surveillance du COS à l'échelle régionale, mais cruciale pour les programmes mondiaux sur la séquestration du COS afin d'atténuer le changement climatique et de réduire l'insécurité alimentaire. L'initiative '4 pour mille : Les sols pour la sécurité alimentaire et le climat', a mis en lumière les sols agricoles comme un levier majeur pour lutter contre le changement climatique et la nécessité d'évaluer le stock de COS à différentes échelles spatiales et temporelles. La spectroscopie infrarouge est apparue comme un outil prometteur pour résoudre ce problème méthodologique. Cette étude vise à évaluer le potentiel des méthodes de mesure en spectroscopie visible-proche infrarouges (VNIR) et moyen infrarouge (MIR) pour prédire le stock de COS et ses variables (teneur en COS et densité apparente) dans les sols volcaniques de l'île de La Réunion. La diversité des sols agricoles de « La Réunion » a été capturée dans le jeu de données avec des types de sol tels que les Andosols, les Cambisols et les Ferralsols. Des régressions partielles des moindres carrés (PLSR) avec une validation croisée leave-un-out ont été employées pour construire des modèles de prédiction. Avec des RPD supérieurs à 2, la présente étude a montré une bonne précision des modèles de prédiction par spectroscopie VNIR et MIR de la teneur en SOC, de la densité apparente et du stock de COS pour des mesures en laboratoire ou sur le terrain. Des prédictions directes et précises du stock de COS ont été réalisées sur des échantillons de sol séchés et tamisés par spectroscopie MIR (RPD = 2,25 ; R^2_{cv} 0,80 ; $RMSE_{cv}$ = 0,69 KgC m^{-2}) et par spectroscopie VNIR (RPD = 2,74 ; R^2_{cv} 0,87 ; $RMSE_{cv}$ = 0,61 KgC m^{-2}) mais aussi directement sur les carottes de sol, sur le terrain par spectroscopie VNIR (RPD = 3,29 ; R^2_{cv} = 0,91 ; $RMSE_{cv}$ = 0,51 KgC m^{-2}). Cette capacité inattendue de prédire directement le stock de COS par spectroscopie infrarouge s'explique en partie par des teneurs élevées en COS couplées à une grande variabilité des teneurs en COS et de la densité apparente, fournissant une large gamme pour ces variables, et donc une prédiction plus précise. Or, ces résultats remettent en question les déterminants sous-jacents de la densité apparente et du stock de COS, paramètres physiques supposés être très difficilement prédictibles par spectroscopie infrarouge. Les analyses des spectres moyens et des coefficients de régression, combinés aux modèles de prédiction des produits amorphes (Alo, Feo, Sio, Alp, Fep), ont démontré que ceux-ci étaient détectés dans les spectres et étaient les déterminants des prédictions précises du stock de COS par spectroscopie infrarouge. Les minéraux paracristallins, notamment les allophanes, apparurent comme proxy de la densité apparente, et les produits amorphes tels que Alp et Fep indiquaient la présence de complexes organo-minéraux impliqués dans le stockage du COS. Ces résultats prometteurs pour la prédiction du stock de COS à partir de spectres proche et moyen infrarouge de sol volcanique semblent montrer que la spectroscopie à réflectance diffuse proche et moyen infrarouge est un outil approprié, rapide, peu coûteux et non destructif, pour étudier les stocks de COS dans les sols volcaniques tropicaux. L'interpolation des stocks de COS des sols agricoles de l'île est maintenant la prochaine étape, après validation externe des résultats, avec des données supplémentaires, pour valider la robustesse des modèles de prédiction.

Mots-clés : Densité apparente ; spectroscopie infra-rouge ; modèles PLSR ; stock de COS ; minéraux paracristallins ; sols volcaniques.

Abstract

Assessing soil organic carbon (SOC) stocks is a methodological issue for SOC monitoring at regional scale but crucial for global agendas of SOC sequestration to mitigate climate change and reduce food insecurity. The '4 per mille Initiative: Soils for Food Security and Climate', highlighted agricultural soil as a major lever for climate action and the need to assess SOC stock at different spatial and temporal scale. Infrared spectroscopy appeared as a promising tool to address this methodological issue. This work aimed to evaluate the potential of visible-near-infrared (VNIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic measurement methods to predict SOC stock and its variables (SOC content and bulk density) in tropical volcanic soils of 'La Réunion' island. The diversity of agricultural soils of 'La Réunion' was captured in the sample set (n=95) with soil orders such as Andosols, Cambisols and Ferralsols. Partial least squares regressions (PLSR) with leave-one-out cross validation were used to build prediction models. With RPD higher than 2, the present study showed good prediction accuracy of models by MIR and VNIR spectroscopy of SOC content, bulk density and SOC stock for measurements in the laboratory or in the field. Accurate and direct SOC stock predictions were achieved on dried and sieved soil samples with MIR spectroscopy (RPD = 2.25; R^2_{cv} = 0.80; $RMSE_{cv}$ = 0.69 KgC m^{-2}) and VNIR spectroscopy (RPD = 2.74; R^2_{cv} = 0.87; $RMSE_{cv}$ = 0.61 KgC m^{-2}) but also directly on cores in the field with VNIR spectroscopy (RPD = 3.29; R^2_{cv} = 0.91; $RMSE_{cv}$ = 0.51 KgC m^{-2}). This unexpected ability to predict directly SOC stocks by infrared spectroscopy can be partly explained by the high SOC content coupled with the large variation of SOC content and bulk density, providing a large range for those variables, and then a higher predictability.Yet these results questioned the underlying drivers of the bulk density and SOC stock, both being largely physical parameters supposed to be hardly predictable by infrared spectroscopy. Analyses of mean spectra and regression coefficients, combined with amorphous product (Alo, Feo, Sio, Alp, Fep) prediction models, demonstrated that these were detected in the spectra and were the drivers of SOC stock accurate predictions by infrared spectroscopy. Short-range ordered minerals, especially allophanes, appeared as proxy of the bulk density, and amorphous products such as Alp and Fep indicated the presence of organo-mineral complexes involved in SOC storage. Such promising results for SOC stock predictions from near- and mid-infrared volcanic soil spectra, confirmed that VNIR and MIR diffuse reflectance spectroscopy are an appropriate tool, rapid, low cost and non-destructive, to study SOC stocks in tropical volcanic soils. Upscaling of SOC stocks across the agricultural soils of the island is now just a step ahead, following external validation with additional data to validate the robustness of the prediction models.

Keywords: Bulk density; Infrared spectroscopy; PLSR models; SOC stock; SRO minerals; Volcanic soils.

3.1 Introduction

Assessing soil organic carbon (SOC) stocks by near- and mid- infrared spectroscopy in tropical volcanic soils of 'La Réunion' is a methodological issue for SOC monitoring at regional scale. It is a requisite to meet global agendas to mitigate climate change and reduce food insecurity where SOC sequestration, through the increase of SOC stocks and protection of carbon-rich soils, can generate co-benefits to achieve several UN Sustainable Development Goals (SDG). This paper presents a major contribution to SOC stock measurement methodologies by demonstrating that infrared spectroscopy can predict with accuracy the SOC stock of volcanic soils both in the field and in laboratory, paving the way to low-cost, rapid and large scale assessments of SOC stocks at national and regional level.

At global scale, SOC sequestration is considered as the most promising agricultural solution to mitigate climate change by removing carbon dioxide from the atmosphere into the soil through photosynthesis (Minasny et al., 2017; Soussana et al., 2017). As soils store about 2400 GtC, three times more C than the atmosphere (820 GtC), an increase of SOC stock at an annual rate of 0.4% per year would mitigate the global fossil fuel emissions (Balesdent and Arrouays, 1999). With this catchy motto, the '4 per mille Initiative: Soils for Food Security and Climate', an ambitious international research program launched in 2015 at COP21, highlighted agricultural soil as a major lever for climate action and the need to assess SOC stock at different spatial and temporal scale.

At regional scale, being highly variable in time and in space, soil is a time-consuming and expensive system to study using standard procedures because of the large number of required laboratory analyses. The assessment of SOC stock, depending of three independent factors (SOC content, bulk density and coarse fragments), require even more time, labour and money. Monitoring carbon storage at regional scale calls for rapid, precise, and low-cost analytical tools. Near- and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy, either in the laboratory or in the field, appeared as a cost and time-effective, as well as non-destructive method, to investigate soil properties in general and soil organic carbon in particular (Gobrecht et al., 2014).

In soil science, near-infrared (NIR) spectroscopy has been used since the 80's and spread in the 90's to determine soil organic matter (Reeves, 2010). Mid-infrared (MIR) spectroscopy has been applied to the analysis of soil organic carbon for the first time in the mid 90's (Janik and Skjemstad, 1995) and has been mostly restricted to laboratory analysis (Reeves, 2010). In practice, NIR spectroscopy requires less sample preparation in the laboratory (2 mm sieved for NIR vs. 0.2 mm sieved with MIR) and is best fitted for in situ analysis than MIR spectroscopy (Bellon-Maurel and McBratney, 2011). Indeed, infrared spectroscopy directly in the field offers even more rapid and cost-effective acquisition thanks to the absence of sample packaging and preparation, allowing the collection of a large number of soil samples in order to assess SOC stock, especially when high spatial resolution is needed.

However, if SOC content predictions by near- and mid-infrared spectroscopy have been addressed many times (Kinoshita et al., 2016; Kusumo et al., 2011; McDowell et al., 2012; Vågen et al., 2006; Viscarra Rossel et al., 2006), bulk density predictions have been rarely accurate (Askari et al., 2015; Minasny et al., 2008; Moreira et al., 2009), and SOC stock predictions are still scarce. Few studies succeeded to predict SOC stock by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy, neither directly in the field on fresh soil samples (Cambou et al., 2016; Roudier et al., 2015) nor by near-infrared spectroscopy (on dried and 2 mm sieved soil samples) or by mid-infrared spectroscopy (on dried and 0.2 mm sieved soil samples) in the laboratory. Therefore, the assessment of soil organic carbon (SOC) stock in soils with infrared spectroscopic needed to be tested in the field and in the laboratory.

The young volcanic island of 'La Réunion' presents a strong rock weathering gradient resulting in a large range of soil types and a high spatial variability. Andosols (IUSS Working group WRB, 2014) are the most predominant soil order and represent the majority of the agricultural area. The specific SOC stabilization of Andosols has been demonstrated in Hawaii, where a positive relationship between non-crystalline minerals and organic carbon highlighted the mineralogical control of SOC storage in volcanic soils (Torn et al., 1997). The important role of poorly crystalline minerals in the storage of organic C in volcanic soils of 'La Réunion' has also been demonstrated (Basile-Doelsch et al., 2005) and the authors proposed to study simultaneously mineral and organic compounds in order to understand the dynamics of organic C in the soil. For that reason, Andosols in 'La Réunion' appeared as perfect models to study SOC storage potential. Thus, the visible-near- and mid-infrared spectroscopic methods to predict SOC stock needed to be evaluated on the whole diversity of soils in 'La Réunion' before it is implemented to map SOC stocks across the island.

The specific objective of the present study was to compare and identify the most efficient infrared spectroscopy method to predict SOC stock on volcanic soils of 'La Réunion'. In this perspective, we explore the performance of visible-near- and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy on dried and sieved soil samples in the laboratory and on fresh soil samples in the field. We developed different prediction models for SOC content, bulk density and SOC stock for each infrared spectroscopic method. We examined the mineral phases possibly linked with soil organic carbon in order to understand the drivers of the SOC stock predictions by infrared spectroscopy in volcanic soils of 'La Réunion'. Our results are reported below.

3.2 Materials and methods

3.2.1 Study sites across a wide range of tropical volcanic soils

The sample set consisted of 95 soil samples from agricultural soils in 'La Réunion', a volcanic tropical island 700 km east of Madagascar in the Indian Ocean. This small and steep island of 2500 km² houses two volcanoes, the 'Piton des Neiges' (3 069 m) stratovolcano, not active for 12 000 years and one of the most active volcanoes on earth: the 'Piton de La Fournaise' (2 632m).

The diversity of agricultural soils of 'La Réunion' was captured in the sample set (Figure 3.1) with soil orders such as Andosols, Cambisols and Ferralsols (IUSS Working group WRB, 2014). 31 soil samples were collected in 2 pasture plots and 64 soil samples were collected in 9 sugarcane plots. The samples were collected between February and May 2016, at the beginning of austral winter. The climate is tropical with temperature and rainfall strongly influenced by altitude. The sampling locations for the field campaign were chosen to represent the two main crop systems in Reunion such as sugarcane and pasture, on the main production areas, as well as by the availability of and permission to access the land.

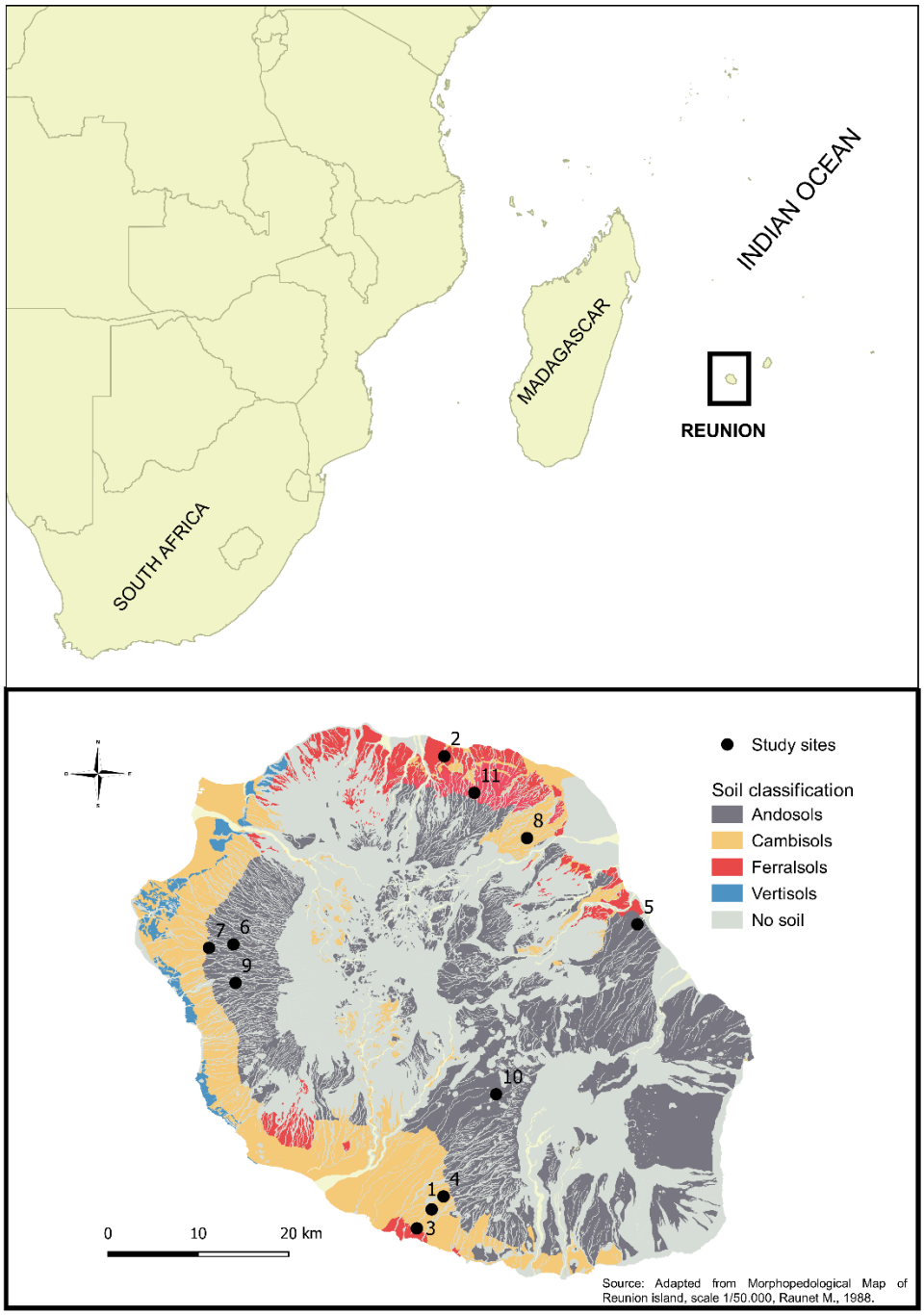


FIGURE 3.1 : LOCATION OF 'LA RÉUNION' AND STUDY SITES LOCATIONS ON THE ISLAND.

3.2.2 Fast and undisturbed soil sampling

Soil cores were collected at each site to at least 0.4 m depth (up to 1 m depth when possible) with a soil column auger inserted into the soil by a gasoline driven mechanical hammer (Cobra TTe, AtlasCopco, Stockholm, Sweden). The cores used were a 1 m core (8.4 cm diameter) with a closed window and a 40 cm core (8.8 cm diameter) with an opened window. The cores were then extracted through a lever-mechanism. In the field, VNIR spectra were recorded directly on the soil from the core (Figure 3.2).



FIGURE 3.2 : IN SITU EXTRACTION OF SOIL CORE (A) AND IN SITU MEASUREMENT OF VNIR SPECTRA (B)

For sites number one to eight, two cores were extracted (less than 1m far from one another): one for the bulk density measurement (denoted as density (D) core) and the other for the spectral measurements (denoted as spectral (S) core) but no replicates were made. The (S) core was cut into 10-cm sections and these soil samples were air-dried for 24h, 2-mm sieved and oven-dried at 40°C for 24h. The (D) core was also cut into 10-cm sections for bulk density measurement. For sites number nine to eleven, only one core was extracted where both bulk density and spectral measurements were realised but three replicates were made in the same plot. The core was cut into 10-cm sections. Coarse fragments were separated from the fine fraction after being air-dried for 24h. The remaining 2-mm sieved fine fraction was oven-dried at 40°C for 24h. For each 10-cm soil samples, two subsamples were used, one for organic carbon laboratory analysis and one for vis-NIR and MIR spectra measurement in the laboratory.

All soil preparations were realised in our laboratory and soil laboratory analysis were undertaken at the CIRAD Laboratory, Saint-Denis, Reunion. Bulk density was calculated as the ratio of the mass of dry fine earth (<2mm) and coarse fragment to the 10-cm soil sample volume. The mass of dry fine earth was determined from aliquots that were oven-dried at 105°C for 48h and weighed to estimate a moisture rate. For each soil sample (e = 10cm depth), SOC stocks were calculated through Eq. (1).

$$\text{SOC stock} = \text{SOC content} * \text{bulk density} * (1 - c) * t \quad (1)$$

where c is the coarse component rate and t the thickness of soil sample (10 cm).

3.2.3 Laboratory analyses

Total organic carbon content was quantified by the Dumas combustion method using an Elementar VarioMax Cube. The organic carbon content was expressed in gC kg^{-1} dry matter. Laboratory analysis

replication was not achieved for these conventional determinations. In the absence of carbonates, all carbon was assumed to be organic.

Additionally, laboratory analyses were performed to quantify amorphous products. Acid-oxalate extractable Al (Alo), Fe (Feo), and Si (Sio) and sodium pyrophosphate extractable Al (Alp) and Fe (Fep) were determined using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). Acid-oxalate extractant is effective in dissolving non-crystalline clay minerals such as allophane, imogolite, ferrihydrite as well as metal–humus complexes. Sodium pyrophosphate extraction is only effective in dissolving metal–humus complexes and it indicates the varying effects of metals in stabilizing soil C. Andosols are characterized by the high concentrations of Alo, which generally represent poorly crystalline aluminosilicates. The value of Alo + 0.5Feo has also been used as a criterion to distinguish andic properties in soil classification (Alo + 0.5Feo > 20 g kg^{-1}) (IUSS Working group WRB, 2014). Allophane content denoted "allophanes" in this study was calculated using the formula by Mizota and Reeuwijk (1989): allophane (%) = 100Sio/[23:4−5:1(Alo−Alp)/Sio] and allophane content denoted "allo" was calculated using the formula by Poulenard and Herbillon (2000): allo (%) = 7.1*Sio. The term "allophane content" could include different short range-ordered minerals such as allophane (hollow spheres of around ~ 4 nm diameter with Al/Si varying between 0.5:1 and 4:1), proto-imogolite allophane (Al/Si ~ 2.1 with a low fibrosity) or imogolite (hollow tubes of ~ 2 nm diameter with Alo/Si ~ 2.1) (Basile-Doelsch et al., 2005).

Three soil samples (0 - 0.3 m depth) close to three soil sites (site 1 (Cambisol), site 2 (Ferralsol) and site 10 (Andosol) on Fig.1) were analyzed in the form of disoriented powder (total soil dried and sieved at 5 µm) by X-ray diffraction (XRD) on a Panalytical X'Pert Pro diffractometer using CuKα radiation (λ = 1.54 Å) with a PIXcel detector. The 2θ range was 0.5 – 130°, with 0.013° steps. All analyses were performed at room temperature. Analytical data were obtained on the ALYSES facility (IRD-SU) that was supported by grants from Région Ile-de-France and mineral identification has been done using the Highscore 3.0 Software.

3.2.4 Spectrum acquisition and analysis

3.2.4.1 Instrument and data acquisition

3.2.4.1.1 Vis-near-infrared diffuse reflectance spectroscopy

We collected vis-near-infrared (VNIR) diffuse reflectance spectra between 350 and 2500 nm at 1 nm interval using a portable spectrophotometer LabSpec 5000 (Analytical Spectral Devices, Boulder, CO, USA). Each spectrum was the result of 100 internal scans. Soil samples were scanned manually with a contact probe (surface area scanned: about 3 cm^2). The white reference standard with zero absorbance was carried out using a reference standard (Spectralon, i.e. polytetrafluoroethylene). Spectral data were recorded as reflectance and then converted into absorbance, which is the logarithm of the inverse of reflectance [absorbance = log(1/reflectance)]. In the field, 30 spectra were acquired per 10 cm soil layer by putting down the contact probe on the soil sample and then averaged in order to produce one spectrum per sample to be used for data analysis. After every 30 spectral acquisitions per 10 cm soil layer, the window of the contact probe was cleaned with ethanol. In the laboratory, 3 spectra were acquired per 10 cm soil layer by putting down the contact probe on the 2-mm sieved and dried soil sample and then averaged to be used for data analysis. After the 3 spectral acquisitions per 10 cm soil layer, the window of the contact probe was cleaned with ethanol.

3.2.4.1.2 Mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy

Mid-infrared diffuse reflectance spectra were collected with a 4300 Handheld FTIR spectrophotometer (Agilent technologies, Santa Clara, CA) outfitted with a diffuse reflectance infrared Fourier transform

(DRIFT) sample interface. The instrument measures reflectance over the range of 650-4000cm^{-1} with a sampling interval of 2 cm^{-1} and spectral resolution of 4 cm^{-1}. Each spectrum was the result of 120 internal scans. A background spectrum was made before every spectrum acquisition. In the laboratory, one spectrum was acquired per soil sample (10 cm soil layer) by putting down the contact probe on the 200 µm sieved and dried soil sample. Spectral data were recorded as absorbance.

3.2.4.2 Spectrum analysis

Spectrum analysis consisted in fitting the VNIR and MIR spectra to the conventionally determined soil variables. Data analysis was conducted using The Unscrambler X 10.5 Software (CAMO Software Inc., Oslo, Norway). The range of 350-2500 nm was used for VNIR spectra and 700-4000cm^{-1} for the MIR spectra because the narrow region from 400 cm^{-1} and 700 cm^{-1} exhibited residual features. These wavenumbers were then excluded from further analysis and interpretation.

Partial least squares regression (PLSR), an extensively used method in chemometrics, was conducted in the present study to build prediction models. Various preprocessing transformations were explored in the initial stages of PLSR modelling to highlight the information contained in the spectra from our dataset and build the best calibration models for SOC content, bulk density and SOC stocks. The pre-processing techniques used in the present study were de-trending (D), standard normal variate (SNV) transformation, combined or not, with smoothing, baseline and first or second derivatives, which led to six preprocessing methods. The pre-processing methods chosen for vis-NIR spectroscopy were none (no preprocessing), de-trending with first derivation (gap size: 13 and Segment size: 7) denoted as D D1, smoothing (13 points) with SNV combined with first derivation (gap size: 13 and Segment size: 5) denoted as SNV D1. The pre-processing methods chosen for MIR spectroscopy were none (no preprocessing), smoothing (13 points) with SNV and baseline (denoted as SNV), or combined with second derivation (Savitzky-Golay: 15-point smoothing, 2-polynomial order) (denoted as D2).

Calibration models were constructed based on partial least squares regression (PLSR) with the reference measurements of SOC content, bulk density and SOC stocks of the sample set (n = 95). Cross-validation was carried out using the leave-one-out method. Outlier identification was carried out to remove extreme values that might over-influence calibration models. The number of calibration outliers removed was limited to 5 % of the dataset. External validation was not carried out because the objective of the study was to identify the most appropriate infrared spectroscopic technique before building robust calibrations to assess SOC stocks.

All pre-processing used for SOC content, bulk density and SOC stocks models were also carried out to build PLSR prediction models for each amorphous product. Calibration models were constructed utilizing partial least squares regression (PLSR) with the reference measurements of Alo, Feo, Sio, Alp, Fep, allo and allophanes of the sample set (n = 95). The validity of the PLSR methods was determined by cross-validation using the leave-one-out method. The number of calibration outliers removed was also limited to 5 % of the dataset. Partial least squares regression (PLSR) was also conducted to build bulk density prediction model from amorphous products (Alo, Feo, Sio, Alp, Fep). Two outliers were removed from the dataset.

The parameters used to assess and compare the performance of the PLSR models were the coefficient of determination (R^2_{cv}), the slope of the linear regression between measured and the model-predicted values in the leave-one-out cross validation, and the standard error of cross validation (SECV). The performance parameters for cross-validation were the ratio of the standard deviation (SD) to SECV (denoted as RPD) (Chang et al., 2001) and the ratio of the interquartile distance (Q3-Q1) to SECV

(denoted as RPIQ) (Bellon-Maurel et al., 2010). Three categories of RPD have been defined by Chang et al. (2001) and have been often used in chemometrics by soil science researchers. With RPD > 2, models were considered as excellent, a RPD comprised between 1.4 and 2.0 indicated fair models whereas RPD < 1.4 accounted for non-reliable models. However, because these thresholds were not based on statistics, Bellon-Maurel et al. (2010) proposed to use a more robust model (RPIQ) based on quartiles to better represent the data spread, especially for non-normal distributions. For the purpose of this study, we considered one model to be better than another if it had higher R^2, RPD, RPIQ values and lower SECV values.

For spectrum analysis, a continuum removal on the raw NIR diffuse reflectance spectra, in order to highlight the mineralogy information, has been achieved using the *prospectr* package (Stevens and Ramirez-Lopez, 2015) in the R satistical language (R Core Team, 2018). Clark and Roush (1984) introduced the continuum removal technique as an effective method to highlight absorption features of minerals. The technique is based on the computation of the continuum (envelope) of a spectrum. Local reflectance spectrum maxima points are identified and then connected by linear interpolation to form the continnum which is then removed from the original spectrum.

3.3 Results

3.3.1 Laboratory analyses show wide range of SOC contents

Reference data resulting from conventional determinations is presented in Table 3.1. Data is given for 10 cm soil samples. The SOC contents of the samples in the full data set ranged from around 3.91 gC kg^{-1} soil in Ferralsol samples to 131.34 gC kg^{-1} soil in Andosol samples, as well as the SOC stocks, which ranged from 0.41 KgC m^{-2} (4.1 tC ha^{-1}) in Ferralsol to 9.73 kgC m^{-2} (97.3 tC ha^{-1}) in Andosol samples. The bulk density ranged from 0.4 g cm^{-3} in Andosols samples to 1.32 g cm^{-3} in Ferralsol samples. This distribution of SOC contents and stocks reflected the large variation in soil type, climatic and altitudinal conditions in 'La Réunion' island.

TABLE 3.1 : DESCRIPTIVE STATISTICS OF SOIL VARIABLES FOR EACH SOIL ORDER (ANDOSOLS, CAMBISOLS AND FERRALSOLS) AND FOR THE TOTAL SET (95 SAMPLES): MEAN, STANDARD DEVIATION, MINIMUM, MAXIMUM

	ANDOSOLS (n=39)				CAMBISOLS (n=37)				FERRALSOLS (n=19)				ALL (n=95)			
	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
SOC Stock (KgC m^{-2})	3.82	2.17	0.70	9.73	1.89	0.88	0.47	4.20	1.97	0.95	0.41	3.28	2.70	1.81	0.41	9.73
SOC content (gC kg^{-1})	62.79	30.44	13.90	131.34	19.65	9.86	4.09	39.42	18.69	8.76	3.91	31.09	37.17	29.81	3.91	131.34
BD (g cm^{-3})	0.69	0.17	0.41	1.07	1.12	0.09	0.88	1.30	1.16	0.09	0.96	1.32	0.95	0.25	0.41	1.32
Alo (g kg^{-1})	41.73	13.94	22.00	66.80	5.51	2.24	2.90	12.30	4.72	2.12	2.10	9.70	20.22	20.18	2.10	66.80
Feo (g kg^{-1})	25.24	6.32	9.80	38.90	10.17	3.70	3.70	15.90	6.21	1.61	2.30	9.00	15.57	9.48	2.30	38.90
Sio (g kg^{-1})	14.46	6.84	4.70	25.80	0.98	0.63	0.30	3.30	0.82	0.73	0.30	2.90	6.48	8.00	0.30	25.80
Alp (g kg^{-1})	9.97	4.90	3.02	19.50	3.54	2.52	0.48	9.82	3.11	1.84	0.65	5.81	6.09	4.83	0.48	19.50
Fep (g kg^{-1})	9.38	7.74	0.51	26.20	6.36	5.55	0.19	23.9	4.17	2.39	0.53	7.90	7.16	6.42	0.19	26.20
allo (%)	10.27	4.86	3.34	18.32	0.70	0.45	0.21	2.34	0.58	0.52	0.21	2.06	4.60	5.68	0.21	18.32
allophanes (%)	12.12	6.10	3.56	24.28	1.26	4.9	NA	16.44	0.18	0.91	NA	1.92	5.51	7.44	NA	24.28
oxalfe (%)	5.44	1.32	3.07	7.91	1.06	0.37	0.50	1.94	0.78	0.28	0.33	1.42	2.80	2.38	0.33	7.91

The Andosol samples presented the higher values of amorphous products. All Andosols samples matched the criteria Alo+1/2Feo > 20g kg^{-1} (oxalfe > 30g kg^{-1}), defining Andosols. According to the criterions proposed by Poulenard and Herbillon (2000), 23 (59%) Andosols samples are silandic (allophanic) horizons corresponding to high allophanes contents. 15 (38%) Andosols samples can be qualified of sialuandic meaning that Al-humus complexes are the predominant secondary constituents but allophane contents might be important.

The X-ray diffraction patterns of the three soil samples analyzed are presented on Figure 3.3. The reflections around 0.735 nm and 0.445 nm were associated with the presence of halloysite (H) in the Ferralsol and Cambisol samples. The XRD patterns also showed the presence of gibbsite (G) in Cambisol and Andosol samples (0.484 nm). Goethite (0.415 nm), magnetite (0.296 nm) and hematite (0.270, 0.252, 0.170, 0.149, 0.145 nm) were also observed.

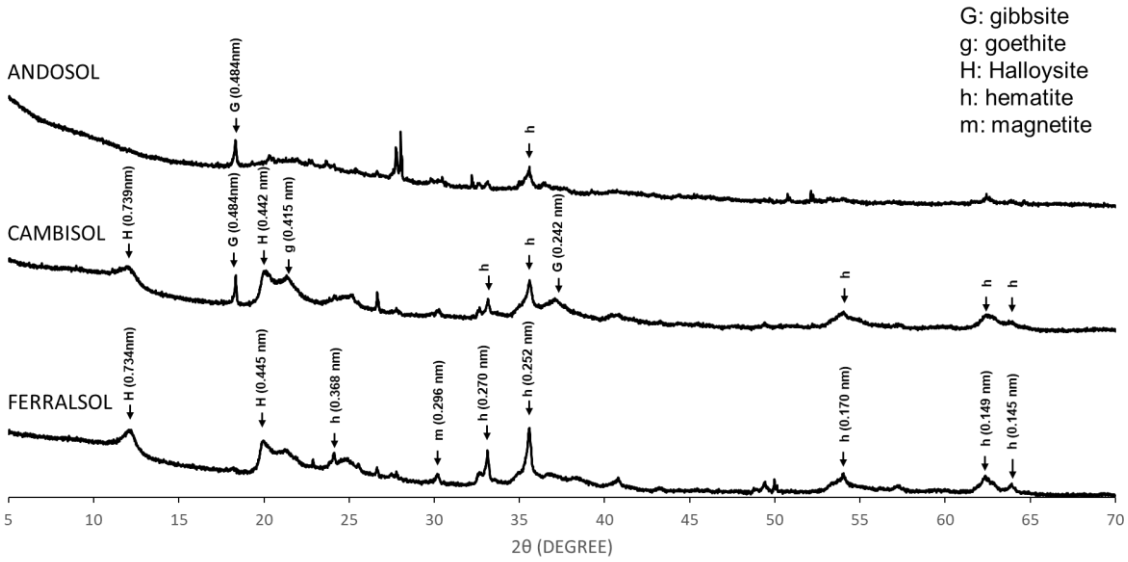


FIGURE 3.3 : XRD PATTERNS OF POWDER PREPARATION FROM THREE SOIL SAMPLES (FERRALSOL, CAMBISOL, ANDOSOL). THE DISTANCE 'D' (IN NM) WAS CALCULATED ACCORDING THE BRAGG'S LAW ($\lambda = 2d\sin\theta$)

3.3.2 Good accuracy of partial least squares regression models

Table 3.2 presents the calibration and the leave-one-out cross-validation results of the PLSR models achieved with different pre-processing methods for VNIR (350-2500 nm) and MIR (700-4000 cm^{-1}) spectral ranges and for three variables: SOC contents, bulk density and SOC stocks. All prediction models have RPD values higher than 2, an indication of excellent model quality according to Chang et al. (2001). Moreover, the RPIQ index (Bellon-Maurel et al., 2010), calculated to assess the reliability of RPD values, confirmed the prediction accuracy, decreasing slightly from SOC content to SOC stocks and finally bulk density. Indeed, better predictions were achieved for SOC contents with RPD (RPIQ) comprised between 2.85 (3.92) and 4.33 (5.88). The SOC stocks were predicted with good accuracy (between 2.25 (2.55) and 3.29 (3.68) respectively). The bulk density predictions presented the lesser good predictions but with RPD (RPIQ) values comprised between 2.27 (3.87) and 2.60 (4.14). Overall, SOC stocks were predicted with accuracy by near- and mid-infrared spectroscopy in the laboratory and in the field on volcanic soils of 'La Réunion'.

The best prediction models for each infrared method were represented on Figure 3.4 and soil samples were identified by soil type: Andosol, Cambisol, Ferralsol. The performance of the VNIR and MIR PLSR models in the lab and in the field was similar for each parameter. The best prediction for SOC content was achieved with MIR spectroscopy and SNV preprocessing. The high R^2_{cv} (0.95) and the low $RMSE_{cv}$ (6.67 gC kg^{-1}) reflect the good quality of the model. Bulk Density and SOC stocks were predicted with the best accuracy using VNIR spectroscopy in the field. The bulk density prediction model was achieved with D D1 preprocessing, and showed an R^2_{cv} of 0.85 and a $RMSE_{cv}$ of 0.10 g cm^{-3}. The SOC stock prediction model was achieved with SNV D1 preprocessing, and presented an R^2_{cv} of 0.91 and a $RMSE_{cv}$ of 0.51 kgC m^{-2} (5.1 tC ha^{-1}). The high variability of SOC contents and SOC stocks between soil types produced accurate prediction models, showing lower values for Ferralsols and Cambisols compared to Andosols. On the contrary, the bulk density prediction model showed lower values for Andosols, which are defined by a bulk density lower than 0.9 g cm^{-3}, than for Ferralsols and Cambisols. The good accuracy of the bulk density prediction models is achieved by the combination both of the variability of bulk density values for every soil type and within Andosols samples.

TABLE 3.2 : CALIBRATION AND CROSS-VALIDATION RESULTS OF SOIL ORGANIC CARBON CONTENT (SOC CONTENT), BULK DENSITY (BD), SOIL ORGANIC CARBON STOCK (SOC STOCK) PREDICTIONS BY PARTIAL LEAST SQUARES REGRESSION (PLSR) MODELS WITH LEAVE-ONE-OUT CROSS VALIDATION, USING VISIBLE-NEAR-INFRARED (VNIR) AND MID-INFRARED (MIR) DIFFUSE REFLECTANCE SPECTRA

Pre-processing	Descriptive statistics					Calibration			Cross Validation								
	N	Mean	SD	Q1	Q3	R^2	RMSE	slope	R^2_{cv}	$RMSE_{cv}$	slope	SECV	bias	$SECV_c$	PCs	RPD	RPIQ
MIR lab																	
SOC content (gC kg^{-1})																	
No	94	36.17	28.32	16.17	55.68	0.95	6.10	0.95	0.90	8.98	0.91	9.03	-0.09	9.03	7	3.14	4.38
SNV	93	36.12	29.01	16.16	55.54	0.97	5.20	0.97	0.95	6.67	0.95	6.70	0.20	6.70	9	4.33	5.88
D2	92	36.07	28.69	16.12	55.59	0.96	5.75	0.96	0.88	10.03	0.89	10.07	-0.44	10.07	6	2.85	3.92
BD (g cm^{-3})																	
No	92	0.95	0.25	0.75	1.17	0.87	0.09	0.87	0.84	0.10	0.85	0.10	0.00	0.10	4	2.50	4.14
SNV	93	0.96	0.25	0.76	1.17	0.85	0.10	0.85	0.82	0.11	0.83	0.11	0.00	0.11	3	2.27	3.75
D2	92	0.96	0.25	0.75	1.17	0.90	0.08	0.90	0.82	0.11	0.83	0.11	0.00	0.11	4	2.27	3.87
SOC Stock (KgC m^{-2})																	
No	94	2.65	1.75	1.38	3.27	0.92	0.48	0.92	0.81	0.73	0.84	0.74	0.06	0.73	7	2.36	2.56
SNV	94	2.62	1.66	1.38	3.27	0.89	0.56	0.89	0.81	0.73	0.85	0.73	0.18	0.73	7	2.27	2.57
D2	92	2.53	1.55	1.38	3.15	0.85	0.59	0.85	0.80	0.69	0.79	0.69	0.14	0.69	3	2.25	2.55
vis-NIR lab																	
SOC content (gC kg^{-1})																	
No	92	36.15	28.49	16.12	55.77	0.95	6.05	0.95	0.92	7.98	0.94	8.02	0.08	8.00	9	3.55	4.94
D D1	92	36.58	28.46	16.19	55.77	0.96	5.42	0.96	0.94	6.96	0.93	7.00	-0.02	6.99	7	4.07	5.65
SNV D1	94	36.17	28.32	16.17	55.68	0.96	5.77	0.96	0.92	8.04	0.94	8.08	0.02	8.05	9	3.50	4.89
BD (g cm^{-3})																	
No	94	0.95	0.25	0.75	1.17	0.87	0.09	0.87	0.81	0.11	0.84	0.11	0.00	0.11	9	2.27	3.82
D D1	94	0.95	0.26	0.75	1.17	0.87	0.09	0.87	0.82	0.11	0.86	0.11	0.00	0.11	5	2.36	3.82
SNV D1	93	0.96	0.25	0.76	1.17	0.87	0.09	0.87	0.81	0.11	0.84	0.11	0.00	0.11	6	2.27	3.75
SOC Stock (KgC m^{-2})																	
No	93	2.64	1.67	1.39	3.28	0.89	0.54	0.89	0.83	0.69	0.86	0.70	0.05	0.69	9	2.39	2.71
D D1	93	2.64	1.67	1.39	3.28	0.91	0.49	0.91	0.87	0.61	0.88	0.61	-0.08	0.61	7	2.74	3.08
SNV D1	94	2.62	1.66	1.38	3.27	0.92	0.48	0.92	0.86	0.62	0.89	0.63	-0.01	0.62	9	2.63	3.01
vis-NIR field																	
SOC content (gC kg^{-1})																	
No	92	36.03	28.72	16.12	55.59	0.94	6.73	0.94	0.91	8.51	0.94	8.56	-0.04	8.53	9	3.36	4.61
D D1	93	35.65	28.02	16.16	55.40	0.94	6.65	0.94	0.90	8.57	0.92	8.61	-0.04	8.59	7	3.25	4.56
SNV D1	93	35.26	27.07	16.16	55.54	0.96	5.51	0.86	0.93	7.34	0.94	7.38	-0.10	7.37	9	3.67	5.34
BD (g cm^{-3})																	
No	94	0.95	0.25	0.75	1.17	0.87	0.09	0.87	0.83	0.11	0.85	0.11	0.00	0.11	7	2.27	3.93
D D1	91	0.96	0.25	0.77	1.17	0.87	0.09	0.87	0.85	0.10	0.87	0.10	0.00	0.10	3	2.50	4.21
SNV D1	92	0.95	0.26	0.75	1.17	0.89	0.09	0.89	0.84	0.10	0.87	0.10	0.00	0.10	6	2.60	4.14
SOC Stock (KgC m^{-2})																	
No	93	2.62	1.67	1.38	3.28	0.97	0.31	0.97	0.89	0.55	0.94	0.55	0.01	0.54	15	3.04	3.47
D D1	91	2.62	1.69	1.38	3.31	0.92	0.49	0.92	0.86	0.63	0.89	0.63	-0.09	0.63	7	2.68	3.04
SNV D1	91	2.62	1.68	1.39	3.26	0.96	0.34	0.96	0.91	0.51	0.93	0.51	-0.10	0.51	12	3.29	3.68

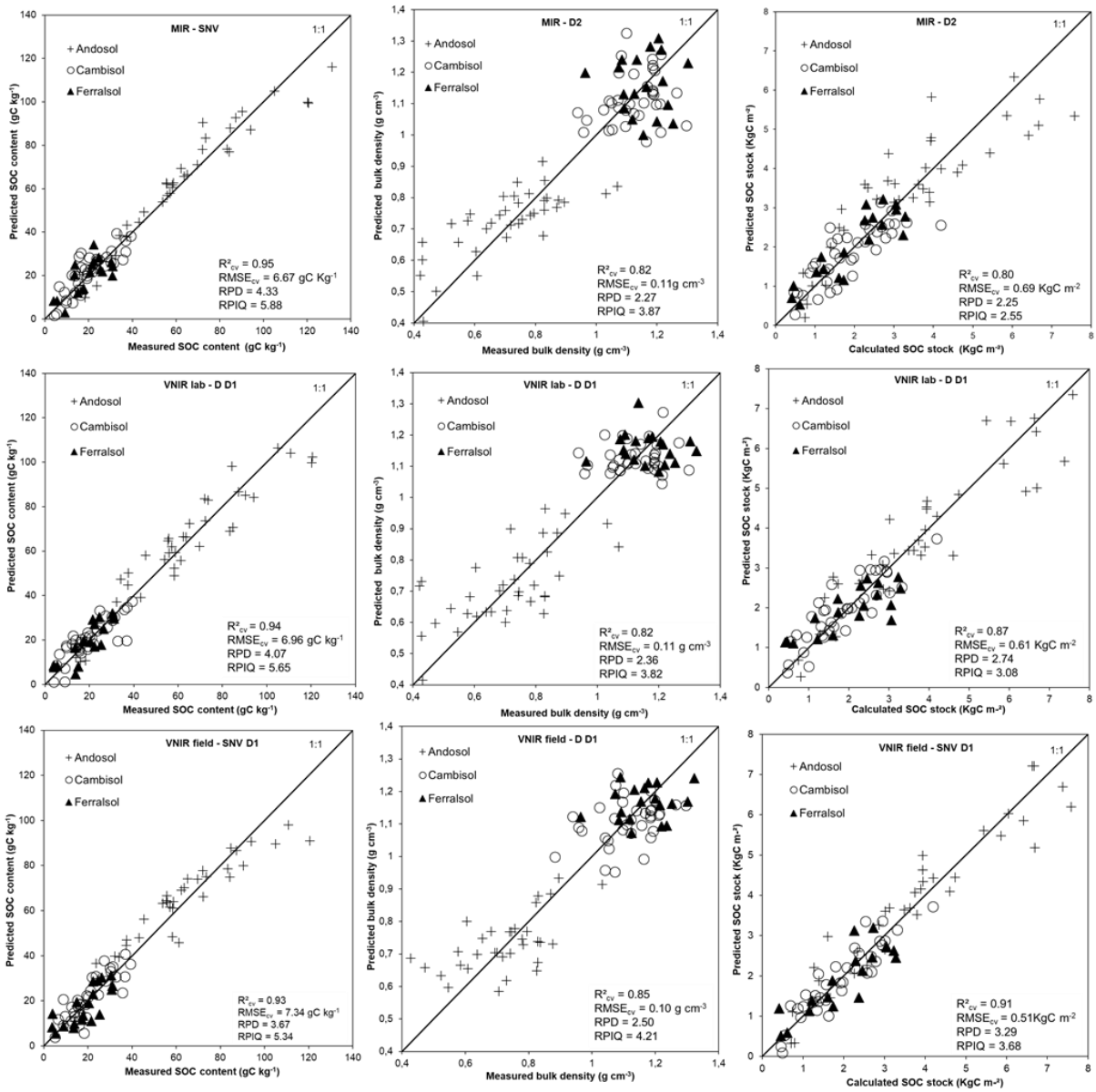


FIGURE 3.4 : MEASURED VS. PREDICTED SOC CONTENT, BULK DENSITY AND SOC STOCK OF THE BEST PREDICTION MODELS BY MID-INFRARED SPECTROSCOPY (MIR) AND VISIBLE-NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY (VNIR LAB) IN THE LABORATORY AND IN THE FIELD (VNIR FIELD). SOIL TYPES WERE REPRESENTED WITH DIFFERENT SYMBOLS ON THE GRAPHS.

3.3.3 Soil mineralogy revealed by spectra analyses

As the prediction models appeared to be related to soil type, the probable role of soil mineralogy has been investigated. For every soil type, a mean spectrum has been plotted for each infrared method (Figure 3.5a and Figure 3.6a).

The mean MIR spectra (Figure 3.5a) highlighted the mineralogical patterns of the three main soil types. The mean MIR spectra of Ferralsols and Cambisols showed two interesting peaks : the peak at 3620 cm^{-1} linked to Al_2OH stretching vibrations of halloysite (Hidalgo et al., 2010) and the trio of peaks of absorbance linked to OH stretching vibrations of gibbsite at 3527, 3464 and 3391 cm^{-1} (Parikh et al.,

2014). The peaks of hygroscopic water at 1640 cm^{-1} and 1390 cm^{-1} (Basile-Doelsch et al., 2005) were on the three spectra but with an higher absorbance on the Andosol spectrum. In addition, the Andosol spectrum showed peaks of absorbance at 1114 and 954 cm^{-1} that could be linked to Si-O vibrations related to Si-rich allophanes (1100 and 970 cm^{-1}) (Levard et al., 2012) and high absorbances between 1200 and 800 cm^{-1} due to the presence of allophanes (Parikh et al., 2014).

The mean NIR spectra (Figure 3.6a) confirmed the presence of hygroscopic water with two absorbance peaks, especially for Andosols, at 1455 and 1930 nm (Rossel and Behrens, 2010). Halloysite, in Ferralsols and Cambisols, could be related to the absorbance peaks at 1414 nm and 2206 nm (Kokaly et al., 2017) whereas gibbsite could be assigned to the absorbance peak which is observable at 2268 nm (Viscarra Rossel et al., 2009). The analysis of mean spectra reflected the large variability of soil types and mineralogy in 'La Réunion' with volcanic soils ranging from Andosols to Ferralsols.

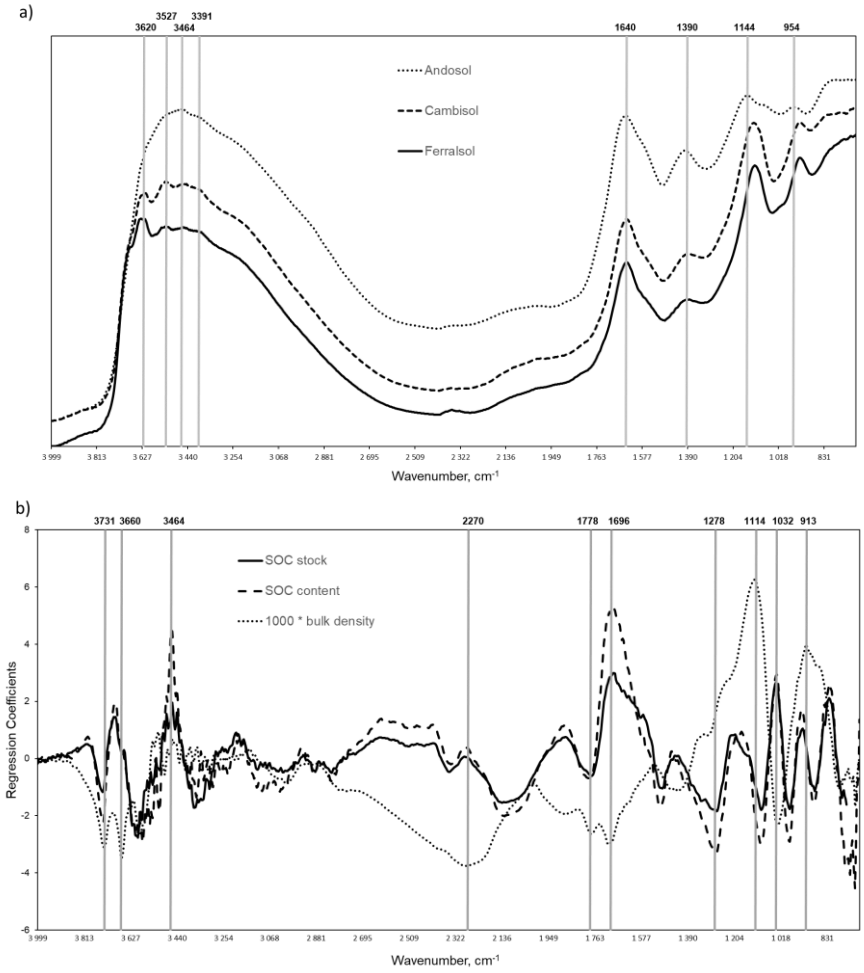


FIGURE 3.5 : MEAN MID-INFRARED SPECTRA BY SOIL TYPE (A) AND REGRESSION COEFFICIENTS OF THE MIR PLSR MODELS FOR THE PREDICTION OF SOC CONTENT, BULK DENSITY AND SOC STOCK USING ABSORBANCE SPECTRA (SNV) (B)

Coefficients of PLS regression were also examined to identify the wavenumbers and wavelengths that contributed heavily to MIR and VNIR SOC stock predictions and therefore, to identify the chemical compounds from which the predictions were build (Grinand et al., 2012). The value (positive or negative) of the coefficient represents the contribution of the wavelength, or wavenumber, in the PLSR prediction model.

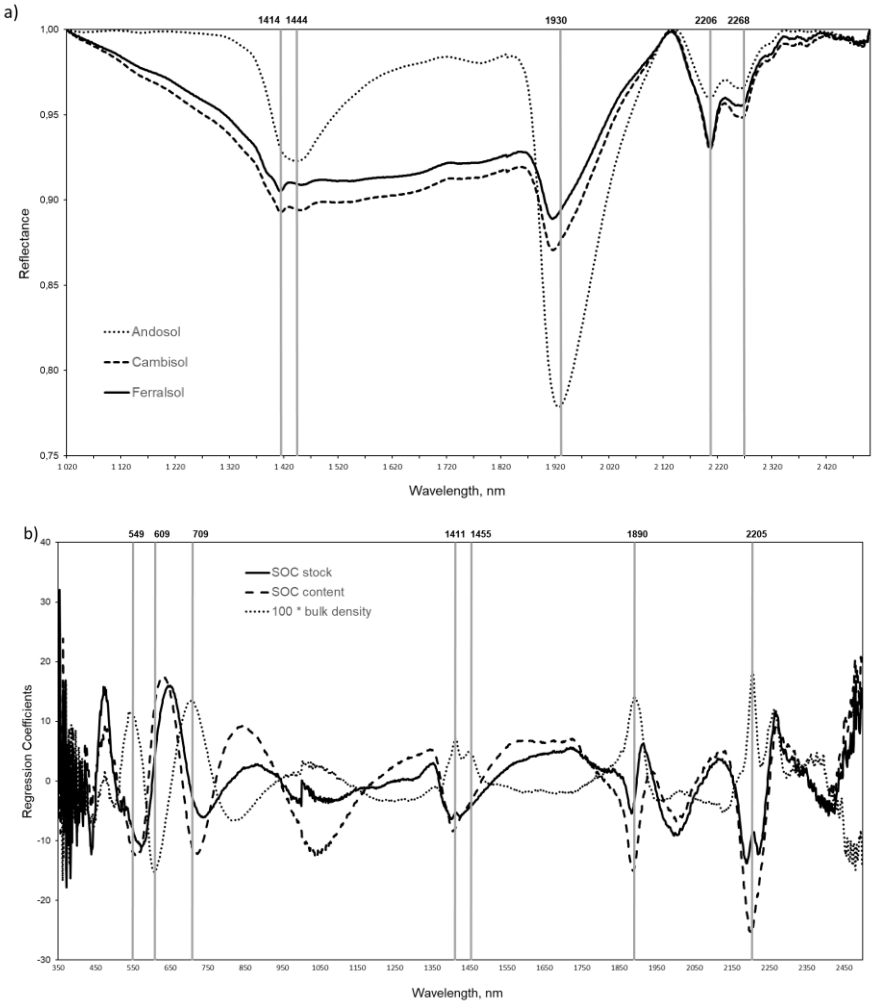


FIGURE 3.6 : MEAN NEAR-INFRARED SPECTRA BY SOIL TYPE (A) AND REGRESSION COEFFICIENTS OF THE VNIR PLSR MODELS IN THE LABORATORY FOR THE PREDICTION OF SOC CONTENT, BULK DENSITY AND SOC STOCK USING RAW ABSORBANCE SPECTRA (B)

Figure 3.5b and Figure 3.6b represent the regression coefficients for SOC content, bulk density and SOC stocks of the MIR and VNIR in the laboratory prediction models. The regression coefficients were examined on raw spectra or on the pre-processed spectra that allowed the best visibility of the different wavenumbers that contributed heavily to the prediction model. The regression coefficients for the MIRS prediction model were examined on the SNV pre-processed spectra, easier to interpret than on raw spectra or on a second derivative. Only the regression coefficients of the VNIRS model in the laboratory on raw spectra were presented because of the redundancy with the VNIRS model in the field.

The comparison between regression coefficients in the three methods (MIR, VNIR lab, VNIR field) showed a general similar trend between regression coefficients for SOC content and SOC stocks. This observation was supported by a high value of spearman's correlation coefficient (ρ) between regression coefficients for SOC content and SOC stocks in the MIR (ρ = 0.93) and VNIR (ρ = 0.84) models in the laboratory and relatively high for the VNIR model in the field (ρ = 0.64) (data not shown). Spectral regions that contributed heavily to the MIRS predictions models for SOC content, stock and bulk density were situated between 3800-3300 cm^{-1} and 1800-700 cm^{-1} (Figure 3.5b). Several spectral regions contributed heavily to the predictions for SOC content and stock (3681, 3459, 1681, 1278,

1110, 1032, 980, 820 cm^{-1}) and for bulk density (3731, 3660, 2270, 1778, 1696, 1114, 913 cm^{-1}). The VNIRS prediction model in the laboratory showed higher absorbance peaks than the VNIRS prediction model in the field. The highest regression coefficients of the VNIRS prediction model were around 600, 680, 1880 - 1910, 2180 - 2260 and 2460 nm for SOC content, stock and bulk density (Figure 3.6b).

For numerous wavenumbers or wavelengths, opposite regression coefficients between SOC content or stock and bulk density have been observed. This observation has also been shown by negative correlation between the regression coefficients of SOC content or stock and bulk density for the three infrared methods. The highest absolute values of the spearman's correlation coefficient between SOC content and bulk density regression coefficients were achieved for the VNIR model in the field (ρ = -0.51) and in the laboratory (ρ = -0.41). Considering the prominence of andic soil samples in our dataset, these opposite regression coefficients between SOC content or stock and bulk density, highlighted by a negative correlation, supported the definition of SOC stocks of Andosols to be a combination between high SOC contents and low bulk density (< 0.9 g cm^{-3}).

The interpretation of infrared spectra has also been used to determine the drivers behind the contributed regions, despite the difficulty in interpreting spectra. The high values of regression coefficients around 1696 cm^{-1} could be related to the influence of hygroscopic water (1639 cm^{-1}) (Basile-Doelsch et al., 2005). Besides, as described in Figure 3.5, the bands around 1114, 1032 or 913 cm^{-1} could be assigned to the presence of allophanes (Basile-Doelsch et al., 2005; Levard et al., 2012). Although spectral interpretation focused widely in the MIR region, overtones and combinations of fundamental vibrational bands in the VNIR region can provide relevant information (Rossel and Behrens, 2010). For the VNIRS prediction models, the high values of regression coefficients (Figure 3.6) between SOC content or stocks and bulk density at 1399, 1466 and 1902 nm could also be assigned to the influence of hygroscopic water (Rossel and Behrens, 2010) related to allophanes content in Andosols. In all prediction models, regression coefficients showed an apparent importance of hygroscopic water and soil mineralogy in SOC stock prediction models.

Overall, accurate and direct SOC stocks prediction were achieved on dried and sieved soil samples with MIRS and VNIRS but also directly on cores with VNIRS in the field. Besides, the analyses of mean spectra and regression coefficients at different wavenumbers or wavelengths, mostly related to soil mineralogy and hygroscopic water, suggest that these elements are the drivers behind the infrared prediction models for volcanic soils of 'La Réunion'.

3.4 Discussion

3.4.1 Rare and in situ SOC stocks predictions by infrared spectroscopy

With RPD higher than 2, prediction models of SOC content, bulk density and SOC stocks by mid- and near- infrared spectroscopy were accurate for volcanic soil of 'La Réunion'. Numerous studies have also investigated SOC content prediction by near- and mid-infrared spectroscopy, as it has been reviewed by Viscarra Rossel et al. (2006), but very few succeeded to predict bulk density and SOC stock, especially for volcanic soils.

For SOC content on dried and sieved soil samples, McDowell et al. (2012) reported good MIR and VNIR PLSR prediction models of soil total carbon content for volcanic soils of Hawaii with calibration and validation set composed of 215 and 92 soil samples, respectively. Two third of their total data set was composed by Andosols, Inceptisols and Oxisols, relatively comparable with the soil types of the present

study (Andosols, Cambisols and Ferralsols). Here, the best MIR prediction model of soil organic carbon content achieved slightly better performances with RPD = 4.35 (RPIQ = 5.88) compared to RPD = 3.91 (RPIQ = 3.38) for the MIR prediction model of soil total carbon content even though cross-validation method results in less robust models than external validation (McDowell et al., 2012). The VNIR prediction models were similar with RPD = 4.25 (RPIQ = 3.66) for the VNIR model presented in McDowell et al. (2012) study compared to RPD = 4.09 (RPIQ = 5.65) in the present study. Moreover, for equivalent R^2 (0.94/0.95), $RMSE_{cv}$ values of MIR (30.8 gC kg^{-1}) and VNIR (28 gC kg^{-1}) PLSR validation models, reported in McDowell et al. (2012), were higher than the MIR and VNIR PLSR cross-validated models presented here (RMSE comprised between 6.67 gC $kg^{-1}$and 10 gC kg^{-1} according the different preprocessing used). However, the SOC contents from the McDowell et al. (2012) dataset (mean = 107.5 gC kg^{-1} and standard deviation = 138.9 gC kg^{-1}) were higher compared to data from this work (mean = 37.2 gC kg^{-1} and standard deviation = 29.8 gC kg^{-1}) (Table 3.1) and thus, resulted in comparable RPD. In Costa Rica, an Andosols dataset (n = 72) showed lower R^2_{cv} (0.85) and higher $RMSE_{cv}$ (12.3 gC kg^{-1}) for SOC content estimation using VNIR PLSR model with the leave-one-out cross validation method (Kinoshita et al., 2016) than our model (R^2_{cv} = 0.94; $RMSE_{cv}$ = 6.96 gC kg^{-1}). Closer to 'La Réunion', a study conducted on 101 Oxisols samples in Madagascar by Vågen et al. (2006), showed similar results with R^2_{cv} = 0.92 and RMSEP = 8.40 gC kg^{-1} for a validation set of 33 samples.

In the field, with similar preprocessing methods (SNV and D1), Cambou et al. (2016), achieved lesser accurate prediction for SOC content in the fine earth of a Luvisol, either for a cross-validation (RPD_{cv} = 1.81; SECV =1.6; R^2_{cv} = 0.72) or for an external validation (RPD_{val} = 1.9; R^2_{val} = 0.75; SEPc = 1.9 gC kg^{-1}) than the VNIR PLSR prediction model for SOC content in the present study (RPD = 3.69; R^2_{cv} = 0.93; $SECV_c$ = 7.37 gC kg^{-1}). However, the range of SOC content values of Cambou et al. (2016) (mean = 13.7 gC kg^{-1} and standard deviation = 3.2 gC kg^{-1}) could explain the smaller $SECV_c$. Higher RPD value (2.62) and an RMSE in between (3.8 gC kg^{-1}) has been achieved for a validation dataset (89 samples from Haplic Arenosols in New Zealand) by a VNIR PLSR model for SOC content from spectra acquired on field-moist intact soil cores (Roudier et al., 2015). The study of Kusumo et al. (2011) exhibited similar performances for total soil carbon (RPD = 2.66; R^2_{cv} = 0.86; $RMSE_{cv}$ = 4.8 gC kg^{-1}) with a leave-one-out cross validation on 38 soil samples from Gley Soils in New Zealand (Hewitt, 1998).

Minasny et al. (2008) tried to predict bulk density from MIR spectra on dried and 0.2 mm-sieved soil samples in Australia. The soil samples from this study came from two databases with a highly diverse composition. But MIR PLSR prediction model was not accurate (RPD = 1.16; R^2 = 0.21; RMSE = 0.09 g cm^{-3}) compared to the bulk density prediction model for volcanic soils of 'La Réunion' (RPD = 2.49; R^2_{cv} = 0.84; $RMSE_{cv}$ = 0.10 g cm^{-3}). Moreira et al. (2009) also achieved poor VNIR PLSR prediction models quality from raw absorbance spectra on dried and 2 mm sieved soil samples (1184 Oxisols samples from Brazil) with lower calibration R^2_{cv} (0.32/0.87) and similar SECV (0.11 g cm^{-3}). However, the study of Askari et al. (2015) predicted more accurately (RPD = 2.04; R^2 = 0.72; RMSE = 0.06 g cm^{-3}) bulk density in grassland soils of Ireland with VNIR PLSR prediction model on raw absorbance spectra for a validation set of dried and 2 mm-sieved 60 soil samples. VNIR PLSR model, on raw spectra in this study presented also good predictions with RPD = 2.31, R^2_{cv} = 0.81 and $RMSE_{cv}$ = 0.11 g cm^{-3}) for cross-validation method. In the field, using VNIR PLSR models, Roudier et al. (2015) reported accurate prediction for bulk density on Arenosols samples from a maize field in New-Zealand with RPD = 2.24; RPIQ = 3.76 and RMSE = 0.11 g cm^{-3} for a validation dataset of 89 soil samples. In the field, using VNIR PLRS models for bulk density, with D and D1 preprocessing, Cambou et al. (2016) succeeded in lesser accurate prediction either for a cross-validation (RPD_{cv} = 1.3; SECV =0.10; R^2_{cv} = 0.42) or for an external validation (RPD = 1.6; R^2 = 0.63; SEPc = 0.08 g cm^{-3}) than the VNIR PLSR model presented in this study (RPD = 2.45; R^2_{cv} = 0.85; $RMSE_{cv}$ = 0.10 g cm^{-3}) with a cross-validation.

Few infrared prediction models for SOC stocks have been reported in the literature to date. In the field, using VNIR PLSR models, Roudier et al. (2015) achieved accurate prediction of SOC stock (RPD = 2.62; RPIQ= 3.76; RMSE = 4.33 kg m^{-3}). Based on SNV and D1 preprocessing, SOC stock prediction model of Cambou et al. (2016) was comparatively less accurate (RPD = 1.8; R^2 = 0.70; RMSE = 2.00 g dm^{-3}) than the VNIR model from this study (RPD = 3.32; R^2_{cv} = 0.91; $RMSE_{cv}$ = 0.51 kgC m^{-2}). Overall, on the diverse volcanic soils of 'La Réunion', the infrared prediction models were particularly accurate thank to the high range of each variable (SOC content, bulk density and SOC stock) in the dataset which is an important factor to build accurate models (Gomez et al., 2012).

3.4.2 A mineralogical control of SOC stocks behind the prediction of SOC stock by near- and mid-infrared spectroscopy?

3.4.2.1 Can bulk density be predicted from amorphous products?

Bulk density being related to soil porosity, is a physical parameter of soil and should not be predicted by infrared spectroscopy, especially when soil structure has been destroyed by the laboratory process for sample preparation (drying, sieving, grinding). Tranter et al. (2007) demonstrated bulk density as being controlled by interactions between clay, sand, organic materials, depth and structural conditions but other factors such as root density, structure or biological life can also affect bulk density. Thus, bulk density appears as hardly predictable by infrared spectroscopy. However, some studies suggested soil physical properties, based on soil structure and pore-space relationships, especially hydraulic properties, could be predicted by mid-infrared (Janik et al., 2007) or near-infrared spectroscopy arguing that soil physical properties were related to clay content and biochemical composition (Shepherd and Walsh, 2007). Tranter et al. (2008) didn't succeed to predict volumetric moisture retention and Minasny et al. (2008) didn't succeed to predict bulk density by mid-infrared spectroscopy.

In this study, the bulk density models by MIR and VNIR spectroscopy were accurate for volcanic soils of 'La Réunion', and appeared as a combination both of the variability of all soil types and of the high variability within Andosol samples. These observations, combined with the interpretation of near- and mid-infrared mean spectra and regression coefficients of PLSR prediction models suggested soil mineralogy and more specifically allophanes in Andosols, as drivers of the infrared prediction models of bulk density and SOC stock. Indeed, low bulk density and large amount of soil carbon stored are characteristic features of Andosols. The development of porous soil structure is the primary factor responsible for the low bulk density of Andosols (< 0.9 gcm^{-3}) and allophane is one of the most important noncrystalline materials contributing to porous soil structure (Shoji et al., 1994). In 'La Réunion', Andosols are characterized by a high content of short-range-ordered minerals. Levard et al. (2012) considered proto-imogolite, allophane and imogolite precursors, as the predominant forms of short-range-ordered minerals in Andosols of 'La Réunion'. Therefore, we investigated the possible link between bulk density and mineral phases of volcanic soils through chemical analysis of amorphous products (Alo, Feo, Sio, Alp, Fep). A PLS regression from amorphous products has been achieved to test the ability of these factors to predict bulk density (Figure 3.7). The RPD (2.50) and RPIQ (4.13) indexes of the PLSR model of bulk density from amorphous products (Alo, Feo, Sio, Alp and Fep) confirmed the model's accuracy and demonstrated that amorphous products could predict bulk density in volcanic soils of 'La Réunion'.

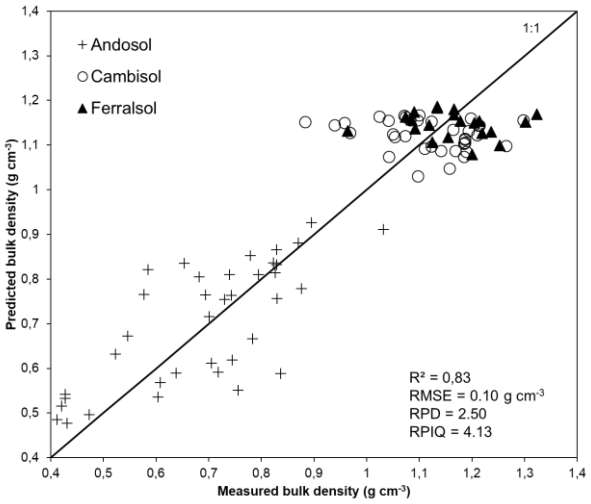


FIGURE 3.7 : MEASURED VS. PREDICTED BULK DENSITY VALUES. THE PREDICTED VALUES WERE OBTAINED BY PLSR MODEL FROM AMORPHOUS PRODUCTS (ALO, FEO, SIO, ALP AND FEP)

3.4.2.2 Can amorphous products be predicted by infrared spectroscopy?

In order to test if amorphous products could be a proxy of bulk density, and therefore the drivers of SOC stocks detected on visible-near- and mid-infrared spectra, PLSR prediction models for each amorphous product have been conducted. Table 3.3 presents the best calibration and the leave-one-out cross-validation results of the PLSR models achieved with no or the most appropriate pre-processing method for VNIR and MIR spectral ranges for all amorphous products.

TABLE 3.3 : CALIBRATION AND CROSS-VALIDATION RESULTS USING THE BEST PRE-PROCESSING METHODS TO PREDICT AMORPHOUS PRODUCTS (ALO, FEO, SIO, ALP, FEP, ALLO, ALLOPHANES). PARTIAL LEAST SQUARES REGRESSION (PLSR) MODELS WERE DEVELOPED WITH LEAVE-ONE-OUT CROSS VALIDATION USING VISIBLE-NEAR-INFRARED (VNIR) AND MID- INFRARED (MIR) DIFFUSE REFLECTANCE SPECTRA

Soil variable	IR method	Pre-processing	Descriptive statistics					Calibration			Cross Validation							
			N	Mean	SD	Q1	Q3	R^2	RMSE	slope	R^2_{cv}	$RMSE_{cv}$	slope	SECV	bias	$SECV_c$	PCs	RPD	RPIQ
Alo	MIR lab	SNV	94	20.20	20.30	4.30	34.20	0.91	6.04	0.91	0.90	6.58	0.90	6.62	-0.11	6.62	3	3.07	4.50
	vis-NIR lab	D D1	92	18.94	19.19	4.30	33.25	0.98	3.44	0.97	0.95	4.27	0.95	4.29	-0.11	4.29	5	4.47	6.75
	vis-NIR field	SNV D1	92	19.00	19.40	4.30	33.30	0.95	4.18	0.95	0.94	4.76	0.94	4.79	0.02	4.79	5	4.05	6.04
Feo	MIR lab	No	92	14.90	8.80	7.00	24.30	0.78	4.11	0.78	0.74	4.51	0.75	4.54	-0.04	4.53	3	1.94	3.82
	vis-NIR lab	SNV D1	94	15.55	9.56	7.00	25.10	0.96	1.81	0.96	0.91	2.84	0.92	2.85	0.07	2.85	10	3.35	6.35
	vis-NIR field	No	93	15.38	9.39	7.00	25.10	0.96	1.78	0.96	0.90	2.95	0.92	2.97	-0.03	2.96	14	3.16	6.09
Sio	MIR lab	SNV	93	6.30	7.90	0.60	9.90	0.97	1.41	0.97	0.92	2.26	0.93	2.28	0.02	2.27	10	3.46	4.08
	vis-NIR lab	D D1	92	5.89	7.41	0.60	9.75	0.95	1.66	0.95	0.92	2.07	0.93	2.08	-0.01	2.08	6	3.56	4.40
	vis-NIR field	SNV D1	93	6.10	7.60	0.60	9.90	0.92	2.08	0.92	0.91	2.36	0.91	2.37	-0.01	2.37	5	3.21	3.92
Alp	MIR lab	No	91	5.80	4.60	2.30	7.77	0.91	1.35	0.91	0.88	1.60	0.89	1.61	-0.05	1.61	5	2.86	3.41
	vis-NIR lab	No	95	6.10	4.80	2.30	8.30	0.93	1.26	0.93	0.87	1.77	0.90	1.78	0.03	1.77	11	2.70	3.32
	vis-NIR field	D D1	95	6.10	4.80	2.30	8.30	0.93	1.24	0.94	0.82	2.08	0.87	2.09	0.04	2.07	11	2.30	2.83
Fep	MIR lab	No	93	6.80	6.10	1.80	10.60	0.82	2.59	0.82	0.74	3.11	0.78	3.13	-0.05	3.11	5	1.95	2.82
	vis-NIR lab	D D1	92	6.59	5.67	1.74	10.60	0.85	2.17	0.85	0.77	2.75	0.80	2.77	0.04	2.76	7	2.05	3.20
	vis-NIR field	No	92	6.83	5.92	1.74	10.65	0.93	1.56	0.93	0.76	2.91	0.82	2.92	-0.15	2.89	15	2.03	3.05
allo	MIR lab	SNV	93	4.40	5.60	0.40	6.96	0.97	0.99	0.97	0.92	1.62	0.93	1.62	0.02	1.62	10	3.46	4.03
	vis-NIR lab	D D1	92	4.18	5.26	0.43	6.92	0.95	1.18	0.95	0.92	1.47	0.93	1.48	0.01	1.48	6	3.55	4.39
	vis-NIR field	SNV D1	93	4.30	5.40	0.40	7.00	0.92	1.48	0.92	0.90	1.68	0.91	1.69	0.00	1.69	5	3.20	3.91
allophanes	MIR lab	SNV	93	5.70	6.90	0.50	8.38	0.94	1.73	0.94	0.88	2.45	0.88	2.46	-0.04	2.46	10	2.80	3.20
	vis-NIR lab	D D1	92	5.60	6.96	0.48	8.30	0.90	2.23	0.90	0.86	2.60	0.85	2.61	-0.03	2.61	5	2.67	3.00
	vis-NIR field	SNV D1	90	5.30	6.70	0.40	8.00	0.92	1.90	0.92	0.90	2.15	0.90	2.16	0.00	2.16	5	3.10	3.48

RPD and RPIQ indexes comprised between 1.95 (2.82) and 4.47 (6.75) indicated the good quality of all amorphous products prediction models with the three spectroscopic methods. The NIR spectroscopy in the laboratory produced the best predictions for each amorphous product (Alo, Feo, Sio, Fep, allo) except for Alp (MIR) and allophanes (NIR field), regarding the RPD and RPIQ indexes. The best prediction models observed were for Alo, and Sio and allo (defined as 7.1*Sio) with RPD > 3.0. The formula of allophanes, being more complex and calculated from Alo, Sio and Alp, infrared prediction models presented slightly lower RPD indexes. Overall, short-range ordered minerals have been accurately predicted by near- and mid- infrared spectroscopy.

As highlighted by the analysis of regression coefficients of SOC stock, content and bulk density in the infrared prediction models and the interpretation of mean spectra by soil type, the presence of allophanes has been detected through absorbance peaks of hygroscopic water, related to the amount of allophanes in NIR spectra and also through Si-O vibrations of allophanes in MIR spectra (Figure 3.5 and Figure 3.6). The accurate prediction of amorphous products (Alo, Sio, Feo) by VNIR and MIR spectroscopy demonstrated the ability of infrared spectroscopic to detect the presence of short-range ordered minerals, mostly allophanes in volcanic soils of 'La Réunion'. Consequently, as amorphous products were predicted by infrared spectroscopy and able to predict volcanic soil bulk density according to the PLSR results, short-range ordered minerals appeared as the proxy, detected in spectra, for the high accuracy of the prediction of soil bulk density.

Additionally, Alp and Fep, indicators of organo-mineral complexes, were predicted with accuracy by near- and mid-infrared spectroscopy with RPD indexes comprised between 1.95 and 2.86. Indeed, in 'La Réunion', the presence of organo-mineral complexes has been demonstrated in the study of Basile-Doelsch et al. (2007) where the largest proportion (82.6%) of organic matter in the studied horizon was associated with minerals in organo-mineral complexes. In a Ferralsol, Basile-Doelsch et al. (2009) demonstrated that 58% up to 80% of organic matter was stabilized into with organo-mineral complexes. For Andosols, Basile-Doelsch et al. (2005) showed that short-range-ordered minerals were bounded with organic matter and stabilized it for several thousands of years.

Thus, these results suggest short-range ordered minerals as being the drivers of SOC stocks thanks to the detection of allophanes as proxy of bulk density but also thanks to the detection of amorphous products such as Alp and Fep indicating the presence of organo-mineral complexes included in SOC storage.

3.5 Conclusion

SOC content and bulk density are the two main factors defining SOC stock. Numerous studies, including the current one, have succeeded to predict SOC content by visible-near- and mid-infrared spectroscopy but few or none have succeeded to predict bulk density or SOC stock. The ability to predict directly SOC stocks by infrared spectroscopy for volcanic soils of 'La Réunion' can be explained by the high SOC content coupled with the large variation of SOC content and bulk density, providing a large range for those variables, and then a higher predictability. However, amorphous products appeared as an unexpected proxy explaining the accuracy of bulk density and SOC stock infrared models for volcanic soils of 'La Réunion'. The detection of short-range ordered minerals, especially allophanes in Andosols, in the spectra allowed the prediction of bulk density by infrared spectroscopy. Overall, the results from PLSR models suggested that VNIR and MIR diffuse reflectance spectroscopy were an appropriate tool to study SOC stocks of volcanic soils. According to the models from this dataset, the choice between

VNIR and MIR spectroscopy method should not have a significant effect on the accuracy of SOC stocks in 'La Réunion'. Therefore, prediction by near- and mid- infrared spectroscopy can be considered as a rapid, cost-effective, non-destructive and a relevant method to assess SOC stocks of tropical volcanic soils. At regional scale, especially for territories with a high spatial variability of soil types, this promising tool could be an interesting procedure to map SOC stocks and help monitoring SOC sequestration at global scale to mitigate climate change. Nevertheless, these models are preliminary evaluations, and transition to practical use will require further model testing on a wider number of samples representing the whole diversity of soil orders and land uses in agricultural soils of 'La Réunion' to increase the robustness of prediction models.

Acknowledgements

This work was co-funded by the European Regional Development Fund (ERDF) Operational Programme for France, the Regional Council of Réunion Island and the French Environment and Energy Management Agency (ADEME). The authors are very grateful to the farmers for authorizing soil sampling in their fields.

Declarations of interest: none.

References

Askari, M.S., O'Rourke, S.M., Holden, N.M., 2015. Evaluation of soil quality for agricultural production using visible–near-infrared spectroscopy. Geoderma 243–244, 80–91. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.12.012

Balesdent, J., Arrouays, D., 1999. Usage des terres et stockage de carbone dans les sols du territoire français. Une estimation des flux nets annuels pour la période 1900-1999. C.R.Acad.Agric.Fr 85, p265-277.

Basile-Doelsch, I., Amundson, R., Stone, W.E.E., Borschneck, D., Bottero, J.Y., Moustier, S., Masin, F., Colin, F., 2007. Mineral control of carbon pools in a volcanic soil horizon. Geoderma 137, 477–489. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.10.006

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. European Journal of Soil Science 56, 689–703. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00703.x

Basile-Doelsch, I., Brun, T., Borschneck, D., Masion, A., Marol, C., Balesdent, J., 2009. Effect of landuse on organic matter stabilized in organomineral complexes: A study combining density fractionation, mineralogy and δ13C. Geoderma 151, 77–86. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.008

Bellon-Maurel, V., Fernandez-Ahumada, E., Palagos, B., Roger, J.-M., McBratney, A., 2010. Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy. TrAC Trends in Analytical Chemistry 29, 1073–1081. https://doi.org/10.1016/j.trac.2010.05.006

Bellon-Maurel, V., McBratney, A., 2011. Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils – Critical review and research perspectives. Soil Biology and Biochemistry 43, 1398–1410. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.02.019

Cambou, A., Cardinael, R., Kouakoua, E., Villeneuve, M., Durand, C., Barthès, B.G., 2016. Prediction of soil organic carbon stock using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in the field. Geoderma 261, 151–159. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.007

Chang, C.-W., Laird, D.A., Mausbach, M.J., Hurburgh, C.R., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. Soil Science Society of America Journal 65, 480–490. https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652480x

Clark, R.N., Roush, T.L., 1984. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 89, 6329–6340. https://doi.org/10.1029/JB089iB07p06329

Gobrecht, A., Roger, J.-M., Bellon-Maurel, V., 2014. Major Issues of Diffuse Reflectance NIR Spectroscopy in the Specific Context of Soil Carbon Content Estimation, in: Advances in Agronomy. Elsevier, pp. 145–175. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420225-2.00004-2

Gomez, C., Lagacherie, P., Coulouma, G., 2012. Regional predictions of eight common soil properties and their spatial structures from hyperspectral Vis–NIR data. Geoderma 189–190, 176–185. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.023

Grinand, C., Barthès, B.G., Brunet, D., Kouakoua, E., Arrouays, D., Jolivet, C., Caria, G., Bernoux, M., 2012. Prediction of soil organic and inorganic carbon contents at a national scale (France) using mid-infrared reflectance spectroscopy (MIRS). European Journal of Soil Science 63, 141–151. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01429.x

Hewitt, A., 1998. Survey of New Zealand soil orders. Landcare Research Science Series, Manaki Whenua Press, Lincoln 11.

Hidalgo, C., Etchevers, J.D., Martínez-Richa, A., Yee-Madeira, H., Calderon, H.A., Vera-Graziano, R., Matus, F., 2010. Mineralogical characterization of the fine fraction (<2µm) of degraded volcanic soils and tepetates in Mexico. Applied Clay Science, Fourth Mediterranean Clay Meeting 49, 348–358. https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.007

IUSS Working group WRB, 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.

Janik, L.J., Merry, R.H., Forrester, S.T., Lanyon, D.M., Rawson, A., 2007. Rapid Prediction of Soil Water Retention using Mid Infrared Spectroscopy. Soil Science Society of America Journal 71, 507-. https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0391

Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 1995. Characterization and analysis of soils using mid-infrared partial least-squares .2. Correlations with some laboratory data. Soil Res. 33, 637–650. https://doi.org/10.1071/sr9950637

Kinoshita, R., Roupsard, O., Chevallier, T., Albrecht, A., Taugourdeau, S., Ahmed, Z., van Es, H.M., 2016. Large topsoil organic carbon variability is controlled by Andisol properties and effectively assessed by VNIR spectroscopy in a coffee agroforestry system of Costa Rica. Geoderma 262, 254–265. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.026

Kokaly, R.F., Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Pearson, N.C., Wise, R.A., Benzel, W.M., Lowers, H.A., Driscoll, R.L., Klein, A.J., 2017. USGS Spectral Library Version 7: U.S. Geological Survey Data Series 1035 [WWW Document]. URL https://doi.org/10.3133/ds1035

Kusumo, B.H., Hedley, M.J., Hedley, C.B., Tuohy, M.P., 2011. Measuring carbon dynamics in field soils using soil spectral reflectance: prediction of maize root density, soil organic carbon and nitrogen content. Plant and Soil 338, 233–245. https://doi.org/10.1007/s11104-010-0501-4

Levard, C., Doelsch, E., Basile-Doelsch, I., Abidin, Z., Miche, H., Masion, A., Rose, J., Borschneck, D., Bottero, J.-Y., 2012. Structure and distribution of allophanes, imogolite and proto-imogolite in volcanic soils. Geoderma 183–184, 100–108. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.015

McDowell, M.L., Bruland, G.L., Deenik, J.L., Grunwald, S., Knox, N.M., 2012. Soil total carbon analysis in Hawaiian soils with visible, near-infrared and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy. Geoderma 189–190, 312–320. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.06.009

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

Minasny, B., McBratney, A.B., Tranter, G., Murphy, B.W., 2008. Using soil knowledge for the evaluation of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for predicting soil physical and mechanical properties. European Journal of Soil Science 59, 960–971. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01058.x

Mizota, C., Reeuwijk, L.P. van, 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions.

Moreira, C.S., Brunet, D., Verneyre, L., Sá, S.M.O., Galdos, M.V., Cerri, C.C., Bernoux, M., 2009. Near infrared spectroscopy for soil bulk density assessment. European Journal of Soil Science 60, 785–791. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01170.x

Parikh, S.J., Goyne, K.W., Margenot, A.J., Mukome, F.N.D., Calderón, F.J., 2014. Soil Chemical Insights Provided through Vibrational Spectroscopy, in: Advances in Agronomy. Elsevier, pp. 1–148. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800132-5.00001-8

Poulenard, J., Herbillon, A.J., 2000. Sur l'existence de trois catégories d'horizons de référence dans les andosols. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science 331, 651–657. https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)01467-1

R Core Team, 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienne, Austria.

Reeves, J.B., 2010. Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done? Geoderma 158, 3–14. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.005

Rossel, R.A.V., Behrens, T., 2010. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. Geoderma, Diffuse reflectance spectroscopy in soil science and land resource assessment 158, 46–54. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.025

Roudier, P., Hedley, C.B., Ross, C.W., 2015. Prediction of volumetric soil organic carbon from field-moist intact soil cores: Predicting volumetric SOC from intact soil cores. European Journal of Soil Science 66, 651–660. https://doi.org/10.1111/ejss.12259

Shepherd, K.D., Walsh, M.G., 2007. Infrared Spectroscopy—Enabling an Evidence-Based Diagnostic Surveillance Approach to Agricultural and Environmental Management in Developing Countries. J. Near Infrared Spectrosc., JNIRS 15, 1–19.

Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R., 1994. Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilization., 1st Edition. ed. Elsevier Science.

Soussana, J.-F., Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlík, P., Richards, M., Wollenberg, E. (Lini), Chotte, J.-L., Torquebiau, E., Ciais, P., Smith, P., Lal, R., 2017. Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative. Soil and Tillage Research. https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.002

Stevens, A., Ramirez-Lopez, L., 2015. R package for processing and sample selection for vis-NIR spectral data: antoinestevens/prospectr.

Torn, M.S., Trumbore, S.E., Chadwick, O.A., Vitousek, P.M., Hendricks, D.M., 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. Nature 389, 170–173. https://doi.org/10.1038/38260

Tranter, G., Minasny, B., Mcbratney, A.B., Murphy, B., Mckenzie, N.J., Grundy, M., Brough, D., 2007. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density. Soil Use and Management 23, 437–443. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00092.x

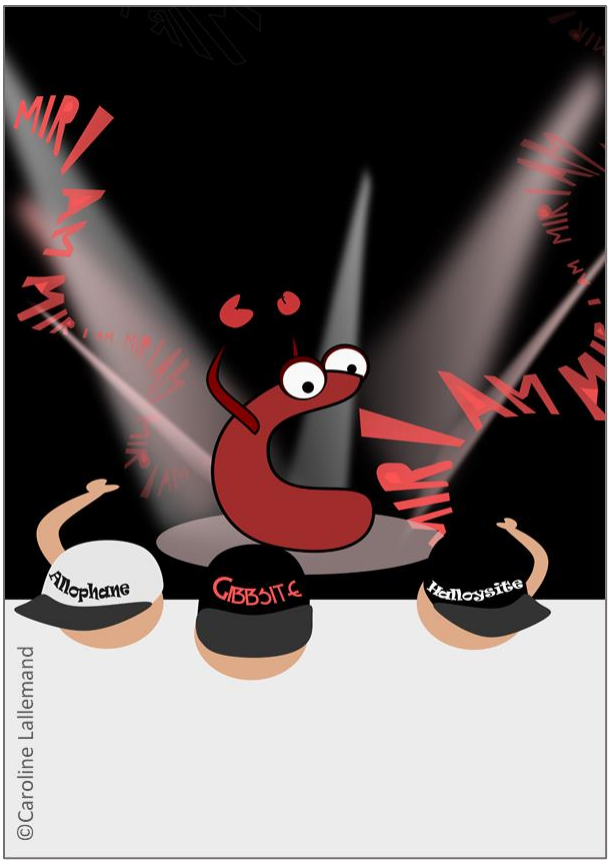
Tranter, G., Minasny, B., McBratney, A.B., Rossel, R.A.V., Murphy, B.W., 2008. Comparing Spectral Soil Inference Systems and Mid-Infrared Spectroscopic Predictions of Soil Moisture Retention. Soil Science Society of America Journal 72, 1394. https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0188

Vågen, T.-G., Shepherd, K.D., Walsh, M.G., 2006. Sensing landscape level change in soil fertility following deforestation and conversion in the highlands of Madagascar using Vis-NIR spectroscopy. Geoderma 133, 281–294. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.07.014

Viscarra Rossel, R.A., Cattle, S.R., Ortega, A., Fouad, Y., 2009. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis–NIR spectroscopy. Geoderma 150, 253–266. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.025

Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. Geoderma 131, 59–75. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007

CHAPITRE 4



CHAPITRE 4. ACCEDER AU POTENTIEL DE STOCKAGE DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICOLES REUNIONNAIS GRACE AUX OUTILS DE LA SPATIALISATION ET DE LA SPECTROSCOPIE MOYEN INFRAROUGE

L'objectif de ce chapitre 4 est d'évaluer les quantités de stocks de COS des sols agricoles (0-30cm de profondeur) et les impacts des changements d'usage des sols agricoles sur ces stocks de COS. Ce chapitre se divise en deux parties. La première partie est la description de la méthodologie utilisée pour une nouvelle classification des sols agricoles à partir de la spectroscopie moyen infrarouge. Une analyse spatiale couplée à une fouille de données a permis d'explorer la base de données d'analyses des sols de La Réunion. Or le premier déterminant du COS étant le type de sol, une méthodologie de classification des sols, basée sur la spectroscopie MIR, a été développée. La deuxième partie du chapitre est rédigée sous la forme d'un article intitulé « Territoire hétérogène et variabilité du carbone des sols : stratification et spatialisation pour évaluer les effets des changements d'usages sur les stocks de carbone organique des sols agricoles de l'île de La Réunion ». Une stratification du territoire a été réalisée en fonction des principaux déterminants du carbone organique du sol afin (i) de spatialiser et quantifier les stocks de COS sur 0-30cm, (ii) d'évaluer les impacts des changements d'usages sur les stocks de COS.

4.1 Méthodologie utilisée pour une nouvelle classification des sols agricoles de La Réunion utilisant la spectroscopie moyen infrarouge

4.1.1 Analyse spatiale et fouille de données

Une analyse spatiale et des méthodes de fouille de données ont été utilisées pour explorer la base de données d'analyses de sols sous canne à sucre, usage agricole majoritaire du territoire.

4.1.1.1 Analyse spatiale des teneurs en carbone organique du sol sous canne à sucre

La base de données d'analyses des sols de la Réunion contient, au moment de cette fouille de données (2014), 42 700 échantillons géoréférencés de sols, prélevés entre 1993 et 2013 dans différents systèmes de culture : canne à sucre, prairie, maraichage, fruitier… dont 80% des analyses proviennent de parcelles de canne à sucre. Une base de données de 7949 analyses de sol sous canne à sucre a été extraite à partir de cette base d'analyses de sols du CIRAD de La Réunion par Gogé (2014) après inventaire, nettoyage, amélioration et complétion de la base (Tableau 4.1; Figure 4.1).

TABLEAU 4.1 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES 7949 ANALYSES DE SOL EXTRAITES DE LA BASE DE DONNEES

	C_org	N	pH	pH_{KCl}	P_{Olsen}	CEC	Ca	Mg	K	Na
	gC kg^{-1}	gN kg^{-1}			mg kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}
Min.	2,70	0,00	3,70	3,50	1,00	0,24	0,00	0,01	0,00	0,00
Q1	25,27	2,20	4,91	4,30	76,00	5,60	1,48	0,95	0,19	0,08
Médiane	34,59	2,95	5,40	4,60	152,48	8,54	3,47	2,11	0,39	0,13
Q3	59,31	4,80	5,90	5,00	306,01	13,50	7,00	4,06	0,83	0,22
Max.	199,00	19,70	9,06	8,26	6080,00	55,77	31,70	40,52	28,60	6,58
Moyenne	44,99	3,74	5,49	4,73	240,67	10,29	4,79	2,97	0,62	0,20
Ecart-type	27,97	2,19	0,75	0,61	282,85	6,58	4,33	2,94	0,79	0,25

La spatialisation des teneurs en COS (Figure 4.1a) recoupe la structure spatiale de la pédogenèse des sols de La Réunion : les teneurs en COS les plus élevées sont observées dans les sols andiques du jeune massif du piton de La Fournaise et en altitude tandis que les teneurs les plus faibles se trouvent au Nord et à l'Ouest de l'île, plutôt en bas de versant, sur les sols les plus anciens. Les valeurs de CEC montrent une forte variabilité dans les sols andiques et les valeurs les plus élevées sont observées dans les sols des bas de versants de l'Ouest de l'île (Figure 4.1b).

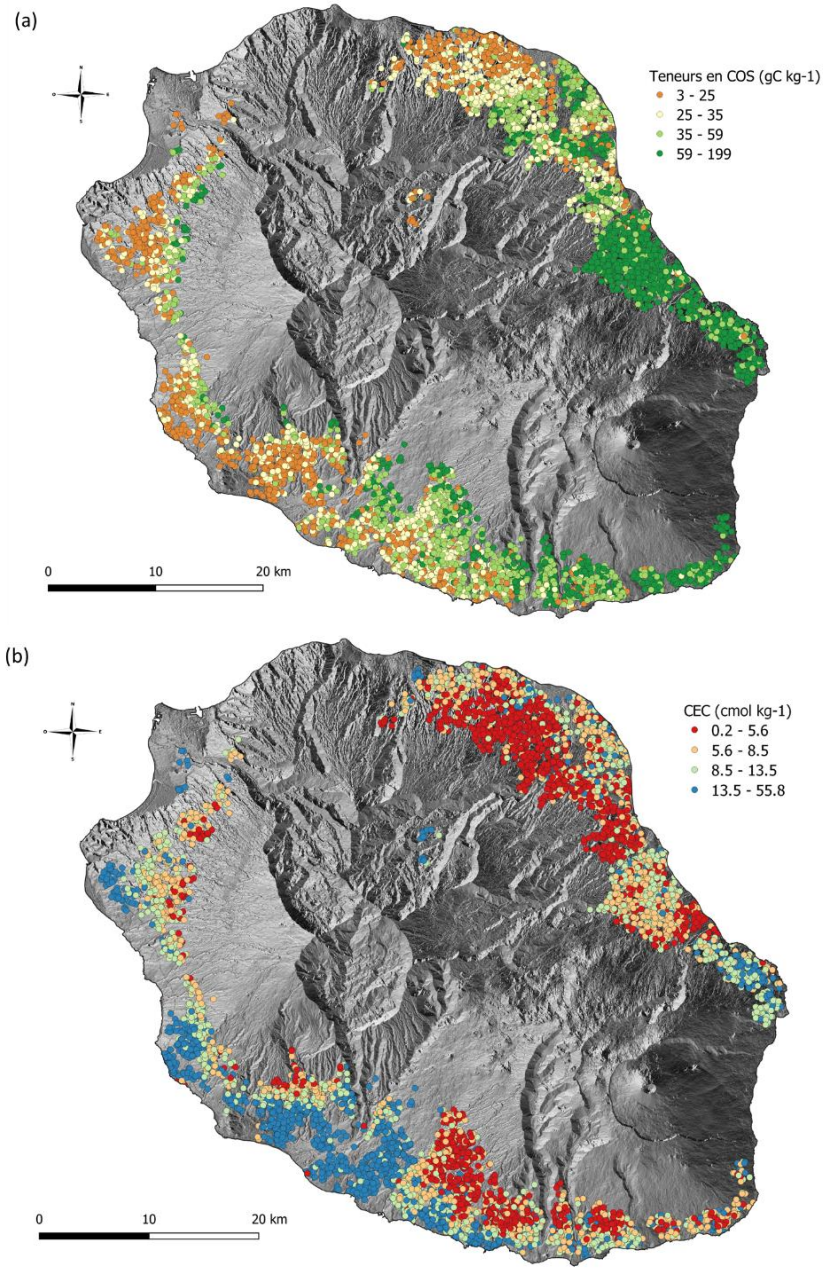


FIGURE 4.1 : CARTOGRAPHIE DES TENEURS EN COS (A) ET DE LA CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE (CEC) (B) DES 7949 ECHANTILLONS DE SOL

La Réunion est un territoire spatialement hétérogène, à la fois d'un point de vue pédologique avec une pédogenèse volcanique tropicale mais également d'un point de vue physico-chimique avec une importante variabilité des propriétés chimiques dont les teneurs en carbone organique du sol et la capacité d'échange cationique.

4.1.1.2 Déterminants du carbone organique du sol (COS)

L'objectif est d'identifier et hiérarchiser les déterminants du carbone organique du sol à partir de prédicteurs tels que des propriétés chimiques du sol (CEC, pH, pH_{KCl}, Ca, Mg, K, Na), des co-variables liées aux sols et à leur pédogenèse (typologie de sol, altitude, pente, précipitation moyenne annuelle (Pluie), température moyenne annuelle (Temp.) et rayonnement moyen annuel (Ray.) et des co-variables liées aux pratiques culturales de la canne à sucre (mode d'irrigation (Mode irr.), de coupe (Mode coupe) et de chargement (Mode charg.) et la culture précédente (Culture pr.)). La méthode des arbres de régression boostés (Boosted Regression Trees BRT) (Elith et al., 2008) a été utilisée sur les 7949 échantillons de sols avec le package 'dismo' (Hijmans et al., 2017) du logiciel R afin de prédire la teneur en COS grâce à ces co-variables.

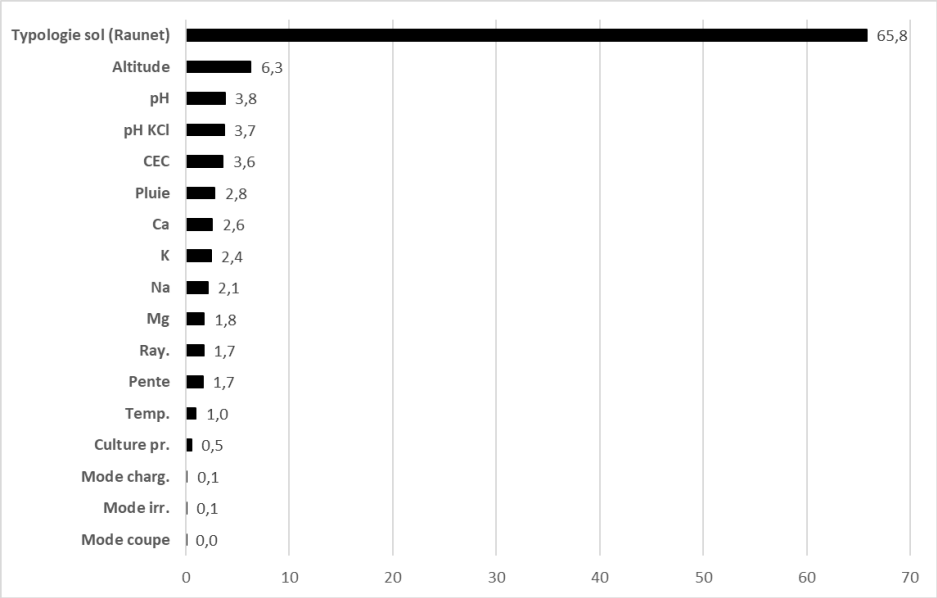


FIGURE 4.2 : : IMPORTANCE RELATIVE DES DETERMINANTS DU CARBONE ORGANIQUE DU SOL CALCULEE PAR L'ALGORITHME BRT

Une analyse par la méthode des arbres de régression boostés (BRT) a ainsi permis d'identifier et de hiérarchiser les principaux déterminants biophysiques du carbone organique des sols agricoles de La Réunion à partir de prédicteurs (Figure 4.2). Les résultats du modèle construit à partir de 5350 arbres sont satisfaisants avec un coefficient de corrélation de validation croisée de 0.85 et une erreur standard de 0.004. Les résultats indiquent que le premier déterminant du carbone organique du sol est le type de sol, avec une importance relative de 66%. Les déterminants en lien avec le type de sol et ayant une importance relative cumulée de 20% sont les propriétés du sol (pH, pHKCl, CEC, Ca, k, Na, Mg). L'altitude et les facteurs climatiques qui lui sont liés (pluie, rayonnement, température) ont une importance cumulée de 12%. En effet, sur le versant Ouest de l'île, plus l'altitude augmente, plus la pluviométrie augmente, et les sols sont de plus en plus andiques. A l'Est, sur le massif jeune du Piton de La Fournaise, les andosols sont présents sur tout le versant, accompagnés d'une pluviométrie importante. Les pratiques culturales ont une très faible importance relative et ne semblent pas être des déterminants du carbone organique du sol à l'échelle régionale.

L'identification et la hiérarchisation des déterminants du carbone organique du sol a permis dans la suite de ce travail de mettre en place une méthodologie de stratification du territoire en unités spatiales homogènes vis-à-vis du carbone organique du sol, basée sur les deux principaux déterminants du COS que sont le type de sol et le climat.

4.1.1.3 Variabilité des teneurs en carbone organique du sol sous canne à sucre

L'étendue des teneurs en carbone sous canne à sucre, de 3 à 199 gC kg^{-1}, montre une forte variabilité du carbone organique du sol sous canne à sucre avec une moyenne de 45 ± 28 gC kg^{-1} à l'échelle de l'île (Figure 4.3).

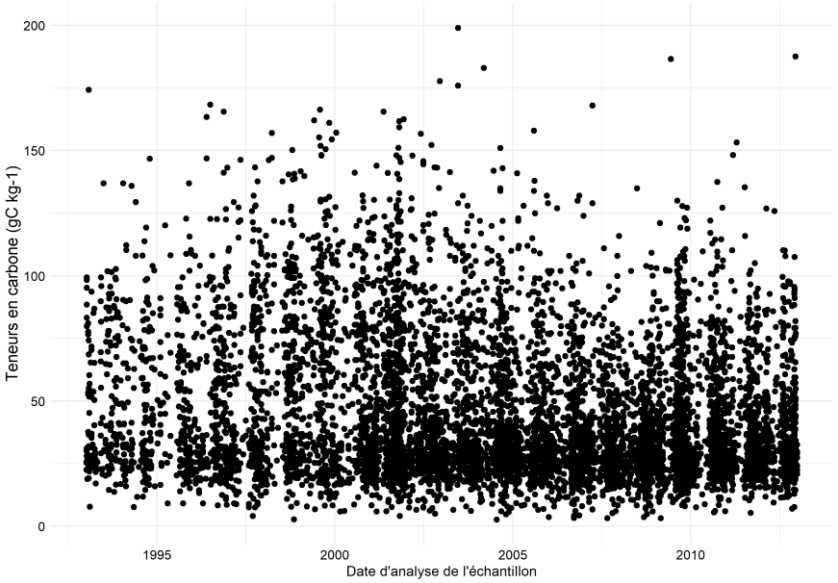


FIGURE 4.3 : TENEURS EN CARBONE ORGANIQUE DU SOL (GC KG^{-1}) DES 7949 ECHANTILLONS DE SOL EN FONCTION DE LEUR DATE D'ANALYSE AU LABORATOIRE

L'analyse de cette base de données montre également une variabilité très élevée des teneurs en carbone au sein de types de sol simplifiés (Pouzet, 2002) (Figure 4.4). Les deux classes d'Andosols (Andosol et Andosol Perhydraté) montrent effectivement des teneurs en carbone organique variant d'un facteur 10 avec des valeurs allant de 20 à près de 200 gC kg-1.

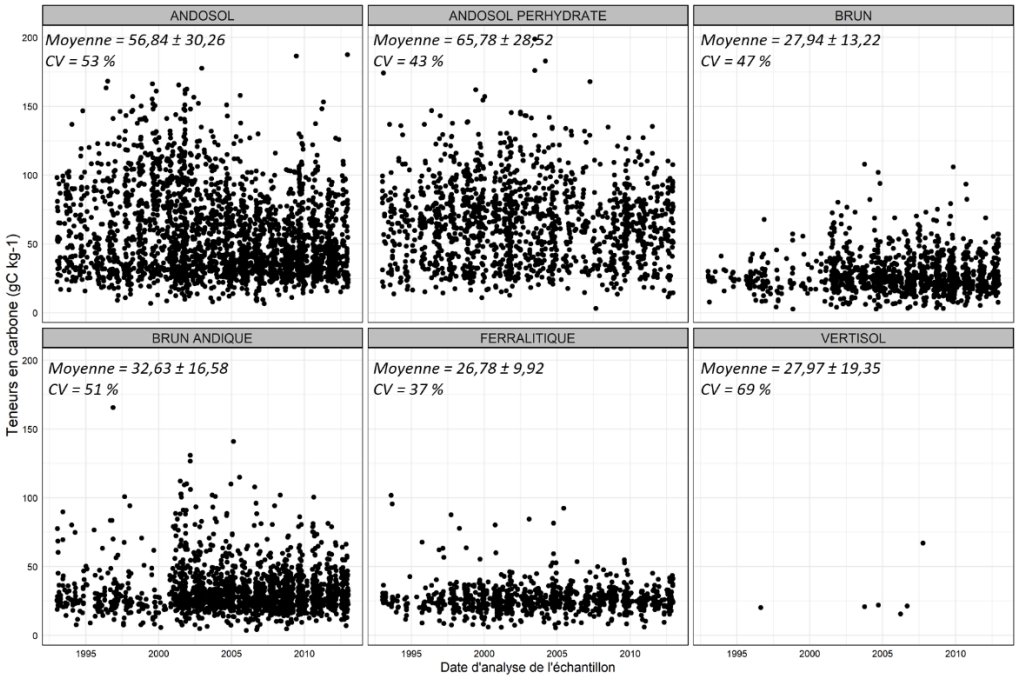


FIGURE 4.4 : TENEURS EN CARBONE (GC KG^{-1}) EN FONCTION DU TEMPS PAR TYPE DE SOL (POUZET, 2002)

Une analyse selon la classification morpho-pédologique des sols de La Réunion (Raunet, 1991) montre également une forte variabilité des teneurs en carbone dans certaines classes de sol (Figure 4.5), notamment les Andosols. Or, observer de tels écarts pour un même type de sol et un même usage séculaire n'est pas cohérent. En effet, une variabilité des teneurs en carbones dans certaines classes de sol est incompatible avec une nature minéralogique du sol déterminée par une seule classe de sol.

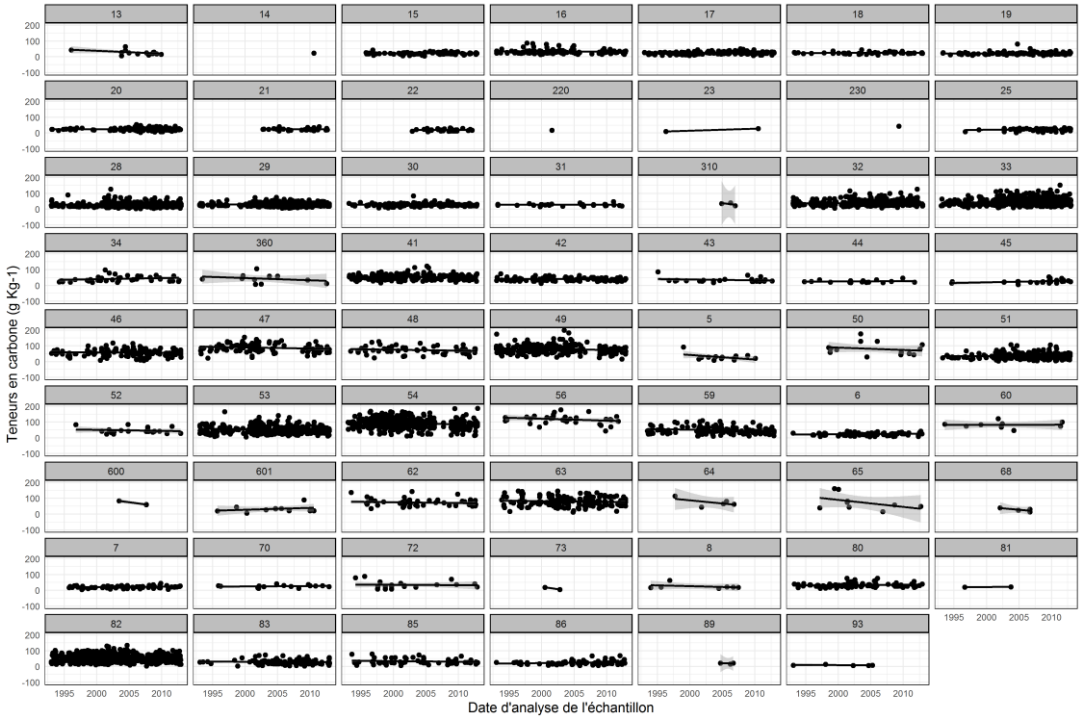


FIGURE 4.5 : TENEURS EN COS (GC KG^{-1}) EN FONCTION DU TEMPS PAR TYPE DE SOL (RAUNET, 1991)

Pour comprendre l'origine d'une telle variabilité, nous avons eu recours à une analyse spatiale basée sur la superposition géographique des unités pédologiques et des mesures de teneurs en carbone. Des incohérences spatiales des teneurs en carbone ont été mises en évidence. Par exemple, une analyse visuelle met en évidence la présence d'échantillons avec une teneur en carbone croissante avec l'altitude dans une même classe de sol (unité 54, Figure 4.6) : de plus de 150 g/kg en altitude à moins de 50 g/kg près du littoral.

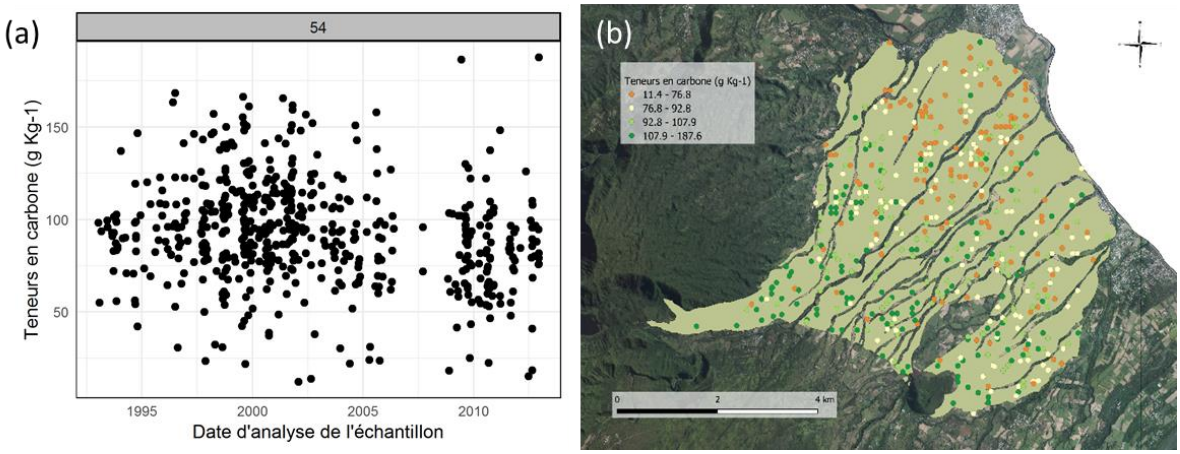


FIGURE 4.6 : TENEURS EN CARBONE (G KG^{-1}) EN FONCTION DU TEMPS (A) ET CARTOGRAPHIE DES TENEURS EN CARBONE (G KG^{-1}) (B) DE L'UNITE « 54 » (RAUNET, 1991)

Ces résultats montrent que la classification morpho-pédologique des sols de la Réunion ne constitue pas un zonage du territoire en unités homogènes du point de vue du carbone du sol. Les unités pédologiques décrites dans la carte morpho-pédologique de La Réunion présentent une variabilité de la teneur en carbone organique du sol incompatible avec une nature minéralogique homogène en raison du fait qu'elle repose, en partie, moins sur des analyses de sol que sur une interprétation du paysage et du modelé de terrain. De plus, sa complexité du point de vue du nombre élevé de classes de sol ne permet pas une stratification efficace du territoire.

Une refonte de la classification des sols pour stratifier le territoire en unités pédologiques est donc nécessaire afin de cartographier et quantifier les stocks de COS des sols agricoles à l'échelle de La Réunion.

4.1.1.4 Stabilité des teneurs en carbone organique du sol sous canne à sucre

L'analyse de la teneur en carbone des échantillons sous canne à sucre au sein de chaque type de sol (Raunet, 1991) révèle une forte variabilité des teneurs en carbone dans certains types de sol mais révèle également une stabilité apparente des teneurs de carbone au cours des 20 dernières années sous culture de canne à sucre à La Réunion (Figure 4.5). Les 7 949 échantillons du jeu de données sous canne à sucre sont issus de 4 551 ilots (un ilot cultural est composé d'une ou plusieurs parcelles ayant le même mode d'usage) de canne à sucre différents. Parmi ces ilots, 1 891 (=5 290 échantillons) ont été analysés plus d'une fois durant la période 1993-2012. L'analyse temporelle des teneurs en carbone des échantillons de sol issues de plusieurs analyses de sol (au moins 6 analyses de sol entre 1993 et 2014) par îlot de canne à sucre montre une relative stabilité des teneurs en carbone au cours du temps (Figure 4.7).

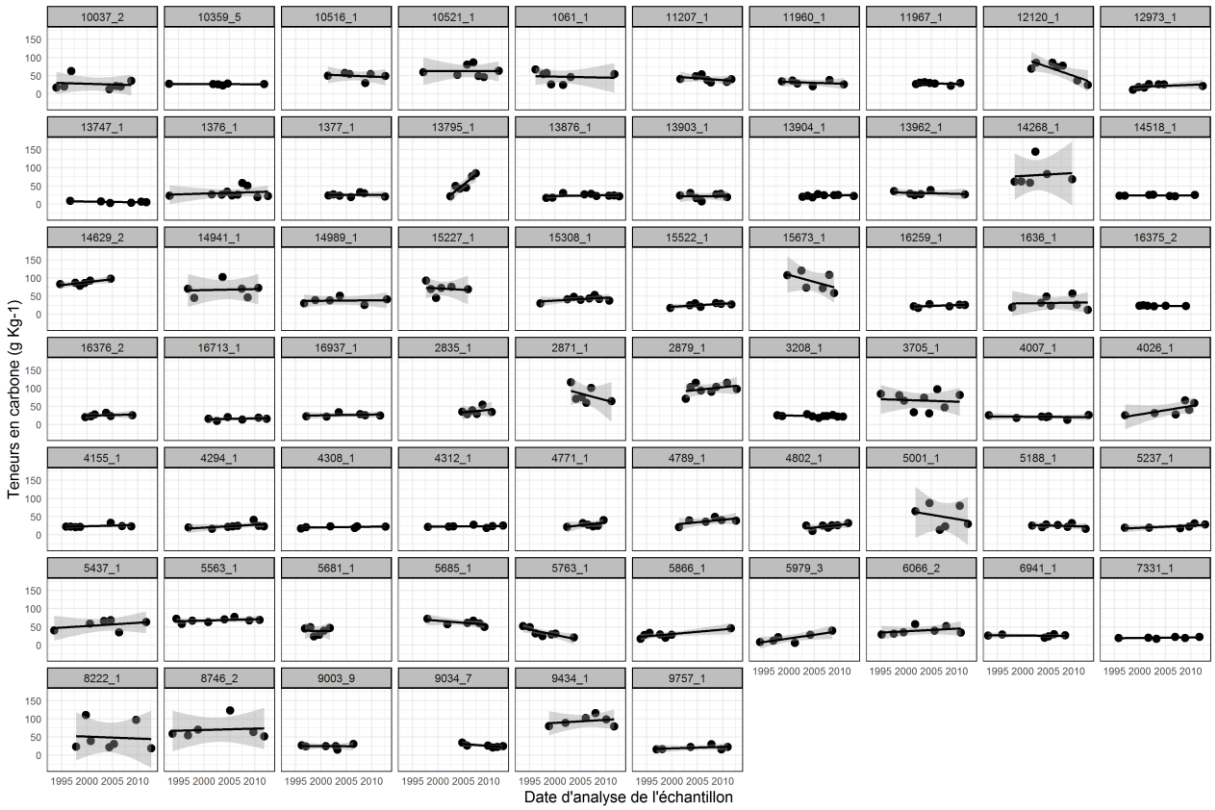


FIGURE 4.7 : TENEURS EN CARBONE (G KG^{-1}) EN FONCTION DU TEMPS PAR ILOT DE CANNE A SUCRE AYANT AU MOINS 6 ANALYSES DE SOL REALISEES DEPUIS 1993

Cette culture est pratiquée à La Réunion depuis plus de 200 ans (>50% de la SAU aujourd'hui) selon des pratiques conservatrices vis-à-vis du carbone : restitution de la paille au sol, sans brûlis, pas de travail du sol hormis à la replantation tous les 7 ans en moyenne. Par ailleurs la canne à sucre est une des plantes qui possède la plus forte efficience de conversion du rayonnement lumineux (quantité de biomasse produite par quantité d'énergie lumineuse photosynthétiquement utile interceptée). Elle produit ainsi une grande quantité de biomasse annuelle. Avec un travail du sol minimal, celle-ci contribue à maintenir un stock de carbone du sol élevé. Un bilan carbone très simplifié peut être réalisé sur la base d'un scénario type de culture de canne à sucre avec un rendement de 100T/ha en matière fraiche (MF) qui produit : 27.2 t de tiges usinables en matière sèche (MS), 12 tMS ha^{-1} de résidus de récolte (ou mulch) en MS et 6.5 tMS ha^{-1} de production racinaire en MS qui meurt et est renouvelé. Avec un taux de minéralisation de 90% et 80% pour la biomasse aérienne et la biomasse racinaire, la quantité de matière organique (MO) produite de :

$$MO = (6.5*0.2+12*0.1) = 1.3+1.2 = 2.5\ T\ ha^{-1}\ an^{-1}, \text{ soit environ } 1.2\ tC\ ha^{-1}\ an^{-1}.$$

La canne à sucre restitue donc une grande quantité de carbone annuellement. Malgré cet apport très important, sur des durées longues (20 ans), on constate une stabilité dans le temps, pour un type de sol donné, des teneurs en carbone grâce à des analyses en fouille de données de la base d'analyses des sols. Il est fait l'hypothèse que le stock de carbone du sol sous canne à sucre, pour un type de sol donné, est à l'équilibre dans ces systèmes de très longue durée. De plus, la canne à sucre, cultivée à La Réunion depuis 200 ans, est considérée comme l'antécédent cultural pour toutes les parcelles agricoles ayant un autre usage aujourd'hui, la canne à sucre est donc considérée dans cette étude comme la référence pour le calcul des différences de stocks de COS entre usages (Δstocks de COS) afin évaluer l'impact des changements d'usages sur les stocks de COS.

4.1.2 Classification non supervisée par partitionnement « k-medoids »

Suite aux résultats de la fouille de données ayant permis d'identifier et de hiérarchiser les déterminants du COS, une méthodologie de stratification du territoire a été développée. Le principe est de cartographier les déterminants biophysiques du carbone organique des sols agricoles de La Réunion que sont le type de sol et le climat afin de constituer une série de couches d'information (strates) qui, après intersection, définit des unités spatiales homogènes vis-à-vis du carbone organique du sol. Cependant, la classification morpho-pédologique des sols de la Réunion (Raunet, 1991) ne constitue pas un zonage du territoire par unité homogène du point de vue du carbone du sol. Les unités pédologiques décrites dans la carte morpho-pédologique de La Réunion présentent une variabilité de la teneur en carbone organique du sol incompatible avec une nature minéralogique homogène en raison du fait qu'elle repose, en partie, moins sur des analyses de sol que sur une interprétation du paysage et du modelé de terrain. De plus, sa complexité du point de vue du nombre élevé de classes de sol ne permet pas une stratification efficace du territoire.

Un nettoyage de la base de données du LIMS contenant 46 000 analyses d'échantillons géoréférencés de sols prélevés entre 1993 et 2017 dans différents systèmes de culture (élimination des échantillons de sols correspondant à des expérimentations agronomiques, élimination des échantillons dont les coordonnées sont aberrantes ou ne correspondent pas à la bonne parcelle, échantillons de prélèvements profonds (>30 cm), etc…), a permis d'extraire 8742 échantillons de sol géoréférencés. Parmi ces échantillons, 962 échantillons de sols, issus principalement de parcelles de canne à sucre, et répartis sur l'ensemble des surfaces cultivées, ont été récupérés à la pédothèque du laboratoire d'analyses de sol et broyés à 200µm (Figure 4.8, Tableau 4.2). Une méthodologie de définition d'unités pédologiques fondée sur la signature spectrale en moyen infrarouge (MIR) de 962 échantillons de sols

de la pédothèque du laboratoire d'analyses de sols de La Réunion a été mise en place. L'objectif est d'utiliser l'information à la fois minéralogique et chimique contenues dans les spectres MIR de sol afin de définir des unités pédologiques.

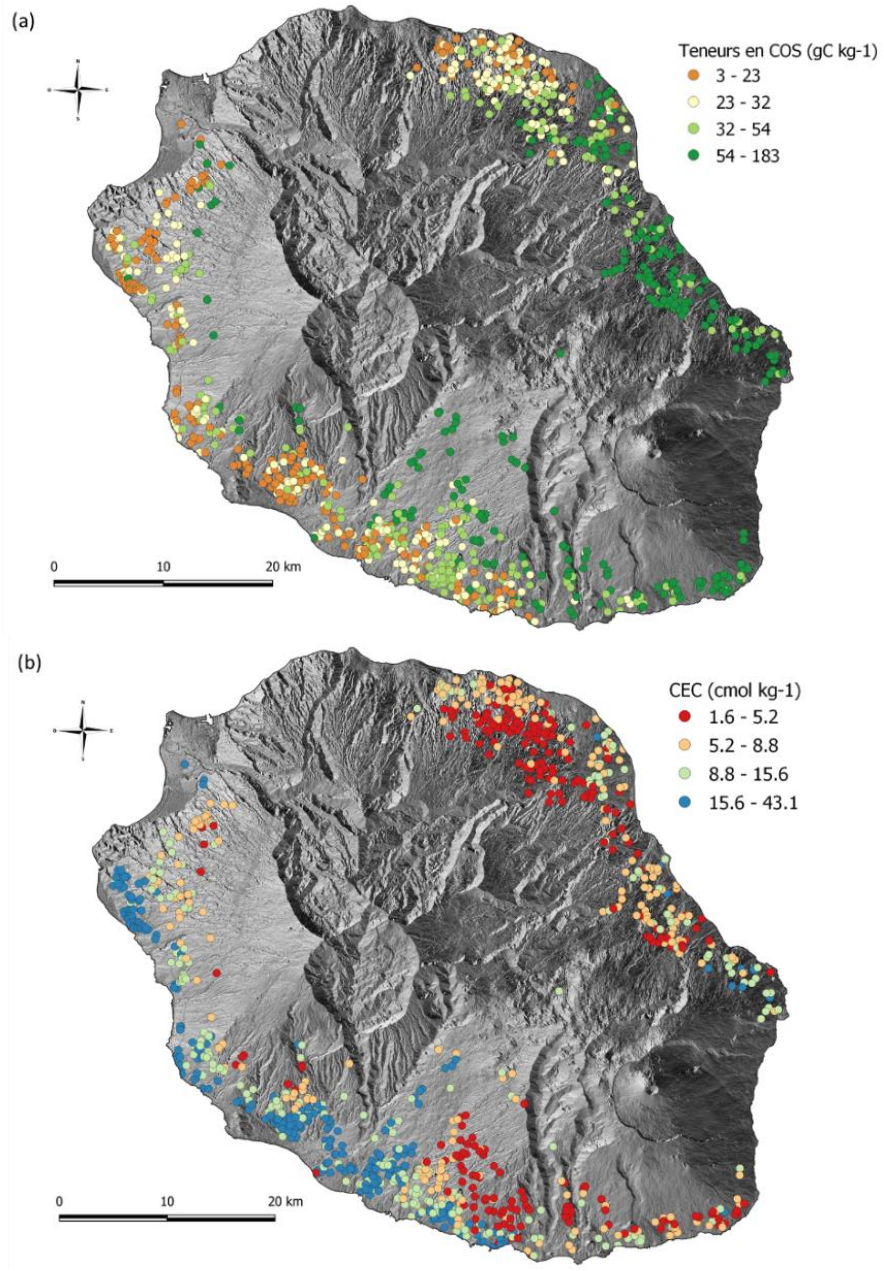


FIGURE 4.8 : CARTE DES TENEURS EN COS ET DE LA CEC DES 962 ECHANTILLONS DE SOL UTILISES POUR LA CLASSIFICATION NON SUPERVISEE

Les 962 analyses de sols, correspondantes aux échantillons sélectionnés, présentent des variations de teneurs en COS similaires à l'ensemble de la base de données sous canne à sucre (7 949 échantillons de sols) avec une moyenne de 42 ± 27 gC kg^{-1} et une étendue de 3 à 183 gC kg^{-1} (Tableau 4.2).

TABLEAU 4.2 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES 962 ANALYSES DE SOL

	C	N	pH	pH_{KCl}	P_{Olsen}	CEC	Ca	Mg	K	Na
	gC kg^{-1}	gN kg^{-1}			mg kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}
Min.	3,42	0,41	4,12	3,67	2,06	1,56	0,04	0,05	0,01	0,02
Q1	23,42	1,96	5,22	4,47	58,43	5,22	1,77	1,06	0,14	0,08
Médiane	32,11	2,65	5,75	4,85	112,67	8,79	4,52	2,47	0,38	0,15
Q3	53,62	4,34	6,45	5,34	233,17	15,64	9,41	5,21	0,90	0,28
Max.	182,64	15,14	8,79	7,62	2572,36	43,09	28,39	20,54	7,48	3,00
Moyenne	41,86	3,43	5,87	4,96	198,96	11,13	5,99	3,58	0,62	0,23
Ecart-Type	27,46	2,18	0,84	0,67	266,03	7,49	5,12	3,27	0,70	0,26

Un spectre moyen-infra-rouge (MIR) a ensuite été acquis avec un spectromètre FTIR portatif Agilent 4300 (Agilent technologies, Santa Clara, CA) en plaçant la tête de l'appareil (DRIFT), directement sur l'échantillon de sol séché et broyé à 200 µm. Chaque spectre est la moyenne de 120 spectres internes acquis en absorbance sur une gamme de nombre d'ondes entre 700 et 4000 cm^{-1}, avec un intervalle de mesure de 4 cm^{-1}. Un spectre de référence (référence « Argent ») est effectué toutes les 30 minutes. Les 962 spectres moyen infra-rouge (MIR) ont subi des prétraitements selon deux méthodes : l'une correspondant à un lissage (13 points), une SNV (Standard Normal Variate) et ligne de base afin de prédire la densité apparente et les produits amorphes à partir de modèles développés sur 95 spectres MIR ayant subis le même prétraitement (Allo et al., 2020). L'autre méthode, plus adaptée pour analyser qualitativement les bandes d'absorptions liées aux minéraux du sol, correspond à un lissage (13 points), une ligne de base, et une dérivée seconde (Gap-segment 5:5 points) afin de mettre en évidence les pics d'absorption liés à la phase minéralogique et organique dans l'objectif de définir des unités pédologiques homogènes à partir de l'information spectrale.

Les quantités de fer, d'aluminium et de silicium extraites par dissolutions sélectives à l'oxalate d'ammonium (Alo, Feo, Sio), au pyrophosphate de sodium (Alp, Fep) et au CBD (citrate-bicarbonate-dithionite) (Alc, Fec) ont été dosées par ICP-AES. Les quantifications de ces produits amorphes (Alo, Feo, Sio, Alp, Fep, Alc, Fec) sur 95 échantillons de sols de La Réunion ont servi de mesures de références pour construire des modèles de prédiction à partir des 95 spectres MIR de ces échantillons de sols. La densité apparente (Dapp) de ces échantillons a été mesurée sur le terrain par la méthode conventionnelle des cylindres. L'objectif est de développer des modèles par spectroscopie MIR de densité apparente (Dapp) et des produits amorphes (Alo, Feo, Sio, Alp, Fep, Alc, Fec) afin de prédire ces variables sur les 962 spectres MIR du jeu de données et ainsi de pouvoir calculer des stocks de COS pour chaque échantillon et analyser la minéralogie des groupes de sol définis par la classification spectrale non supervisée. Les modèles de calibration de la densité apparente (Dapp) et des produits amorphes (Alo, Feo, Sio, Alp, Fep, Alc, Fec) ont été construits à partir de 95 spectres MIR (Allo et al., 2020) en utilisant une partial least squares regression (PLSR), la méthode leave-one-out a été utilisée comme validation croisée (Tableau 4.11 : Modèles de calibration et de validation croisée de la densité apparente et des produits amorphes par PLSR à partir de 95 spectres MIRTableau 4.11). Les paramètres utilisés pour évaluer la performance des modèles PLSR sont le coefficient de détermination (R^2_{cv}), l'erreur standard de la validation croisée (SECV) et deux indicateurs que sont le RPD (ratio de l'écart-type de la population sur l'erreur standard de la validation croisée) (Chang et al., 2001) et le RPIQ (ratio de la distance interquartile sur l'erreur standard de la validation croisée) (Bellon-Maurel et al., 2010).

La densité apparente et les produits amorphes ont ensuite été prédits sur les 962 spectres MIR à partir de ces modèles. L'analyse chimiométrique des données spectrales a été réalisée avec le logiciel The Unscrambler X 10.5 Software (CAMO Software Inc., Oslo, Norway).

Afin de définir des unités pédologiques fondées sur la signature spectrale en moyen infrarouge (MIR) de ces 962 échantillons de sols et compte tenu de la spécificité des sols volcaniques tropicaux de La Réunion, une classification par partitionnement a été proposée. Une première classification en 2 groupes a été réalisée afin de subdiviser les sols andiques et les sols non andiques. Ces deux sous-groupes ont ensuite été subdivisés : les sols allophaniques ont été divisés en 5 groupes et les sols non allophaniques en 4 groupes. Les échantillons de sols ont donc été répartis en 9 groupes de sol, homogènes d'un point de vue spectral. Le nombre de groupes de sol a donc été choisi par expertise, sur plusieurs critères pédologiques.

4.1.2.1 Dichotomie des sols volcaniques tropicaux de La Réunion

Un partitionnement k-medoids en 2 groupes à partir des spectres MIR permet de séparer deux classes de sol : les sols à halloysite et sans halloysite, ce que l'on peut observer sur le spectre moyen du groupe 1 avec un pic d'absorption très marqué à 3620 cm^{-1}, caractéristique de l'halloysite (Joussein et al., 2005) (Figure 4.9a). Cette dichotomie correspondant également à la dichotomie des sols allophaniques et non allophaniques comme le démontre l'indicateur « Oxalfe » (Al_o +1/2 Fe_o), calculé à partir des valeurs prédites des produits amorphes, qui permet de définir les sols allophaniques lorsque la valeur est supérieure à 20 g kg^{-1} (Figure 4.9b).

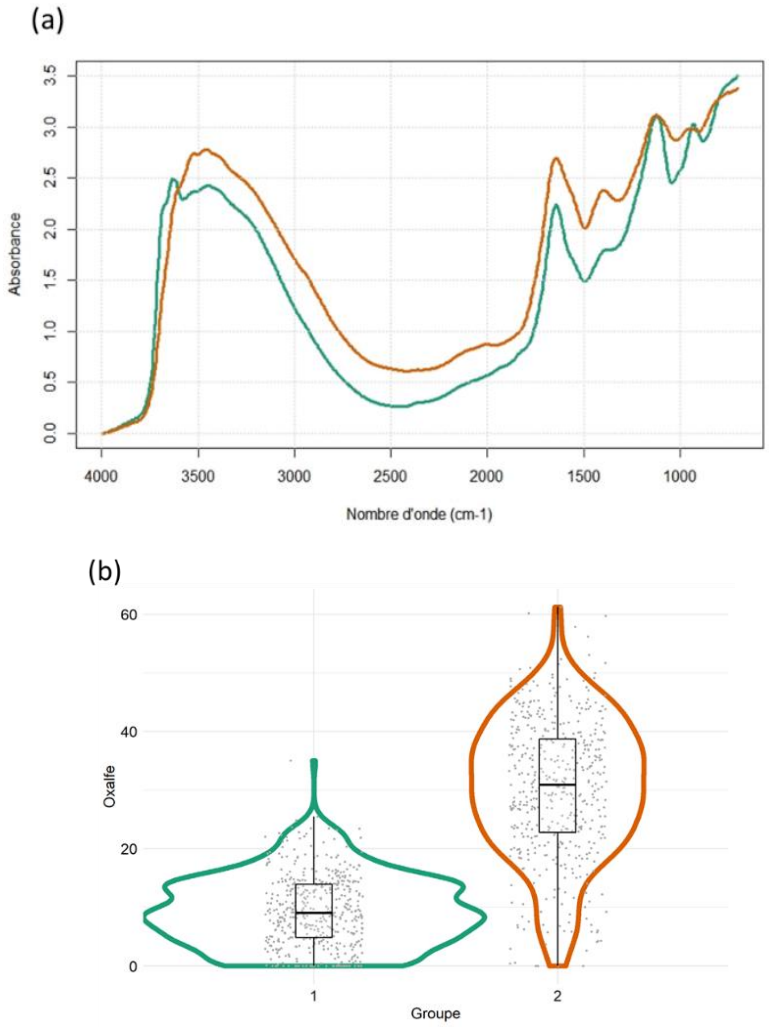


FIGURE 4.9 : SPECTRE MIR MOYEN PAR GROUPE DE SOL (A) ET INDICATEUR « OXALFE » (G KG^{-1}) (B) PAR GROUPE DE SOL

L'ACP des spectres MIR (Figure 4.10a) montre une séparation très nette des 2 groupes sur la 1ère composante principale. L'ACP des produits amorphes (Figure 4.10b) montre également que le groupe 2 regroupe les sols allophaniques (Si_o, Al_o, Fe_o) et des sols à gibbsite dont Fe_c est un indicateur.

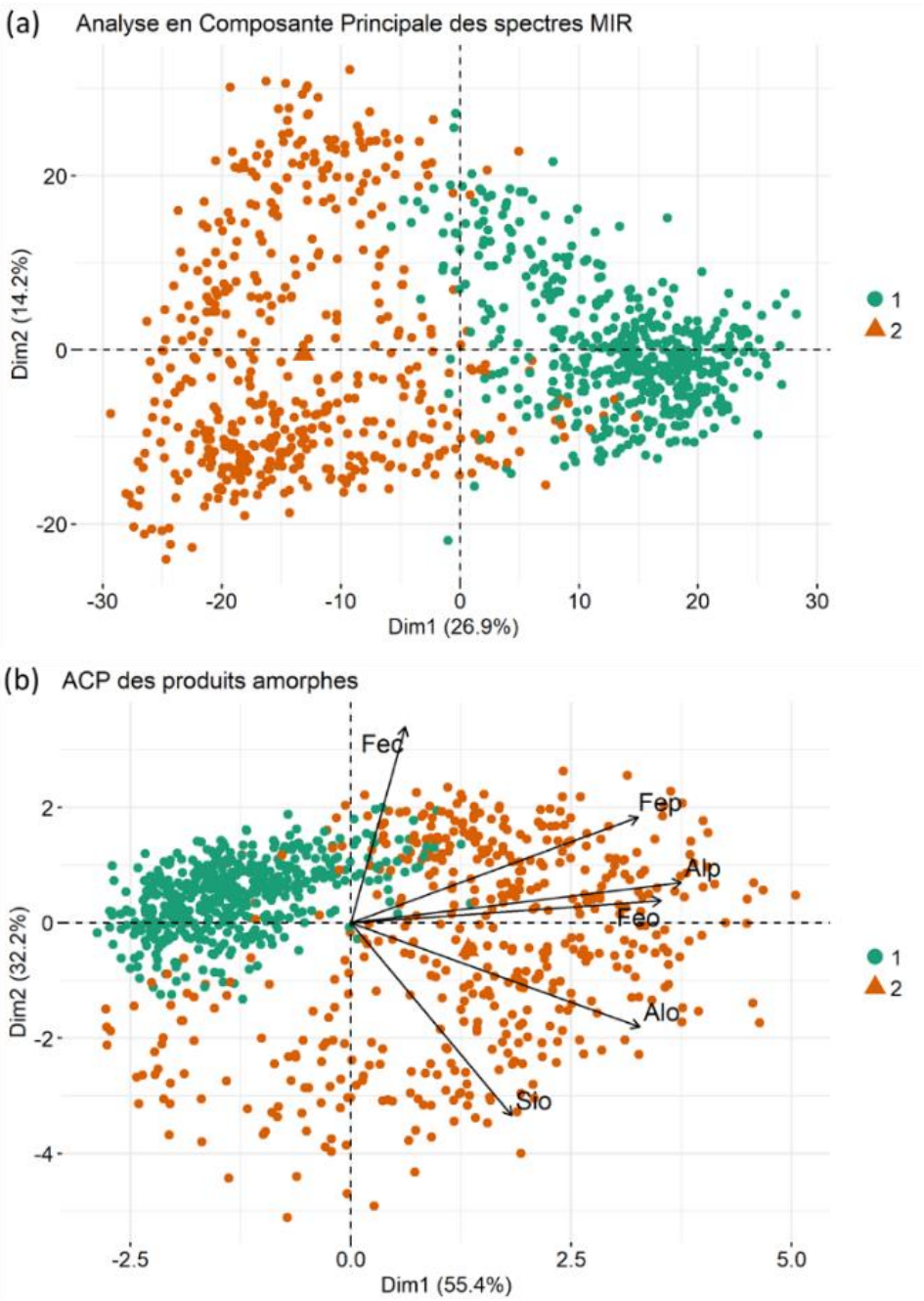


FIGURE 4.10 : ACP DES SPECTRES MIR (A) ET DES PRODUITS AMORPHES (B) SELON 2 GROUPES DE SOL

Ce résultat est confirmé par la spatialisation de ces deux groupes de sol (Figure 4.11) et par leur répartition dans les classes de sol simplifiées de La Réunion (Pouzet, 2002) (Tableau 4.3).

TABLEAU 4.3 : TABLE DE CONTINGENCE ENTRE LA CARTE MORPHO-PEDOLOGIQUE SIMPLIFIEE (POUZET, 2002) ET LES 2 GROUPES DE SOL

Type de sol (Pouzet, 2002)	1	2
Andique non perhydraté	18	132
Andique perhydraté	1	109
Brun	223	21
Brun andique	91	58
Ferrallitique	55	6
Ferrallitique loc. andique	30	25
Sol sur alluvions	8	88

En effet, 90 % des échantillons de sols de type Brun ou Ferrallitique sont classés dans le groupe de sol n°1 tandis que plus de 90 % des échantillon de sols de type Andique non perhydratés ou perhydratés sont classés dans le groupe de sol n°2. La classification en 2 groupes de sol permet donc de séparer les échantillons de sol selon leur caractère andique ou non andique.

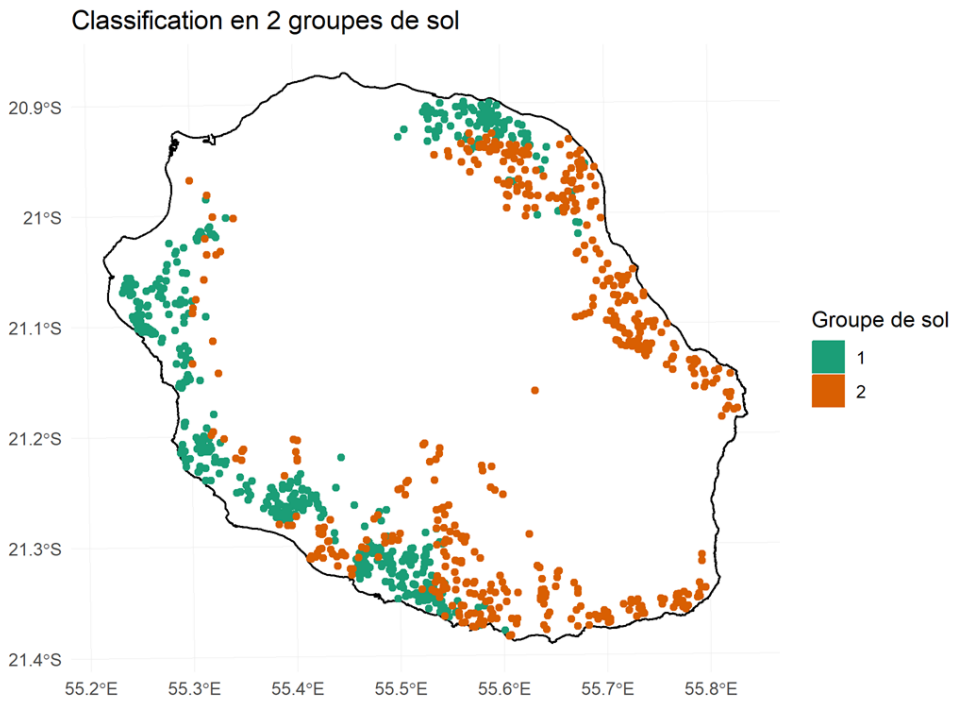


FIGURE 4.11 : CARTOGRAPHIE DES 2 GROUPES DE SOL

4.1.2.2 Subdivision des sols à caractère andique (1er groupe) en 5 groupes par k-medoids

L'indicateur « Oxalfe » (Al_o + ½ Fe_o), qui définit le caractère andique des sols, est supérieur à 20 g kg^{-1} pour les groupes de sol 3, 4, 5 tandis que les médianes des indicateurs « Oxalfe » des groupes 1 et 2 sont autour de 20 g kg^{-1} indiquant que les échantillons de sol de ces 2 groupes ont un caractère plus ou moins andique (Figure 4.12a). Les densités apparentes prédites (Figure 4.12b) permettent également de différencier les groupes à caractère plus ou moins andique (D_{app} < 0.90 g cm^{-3} par définition pour les Andosols).

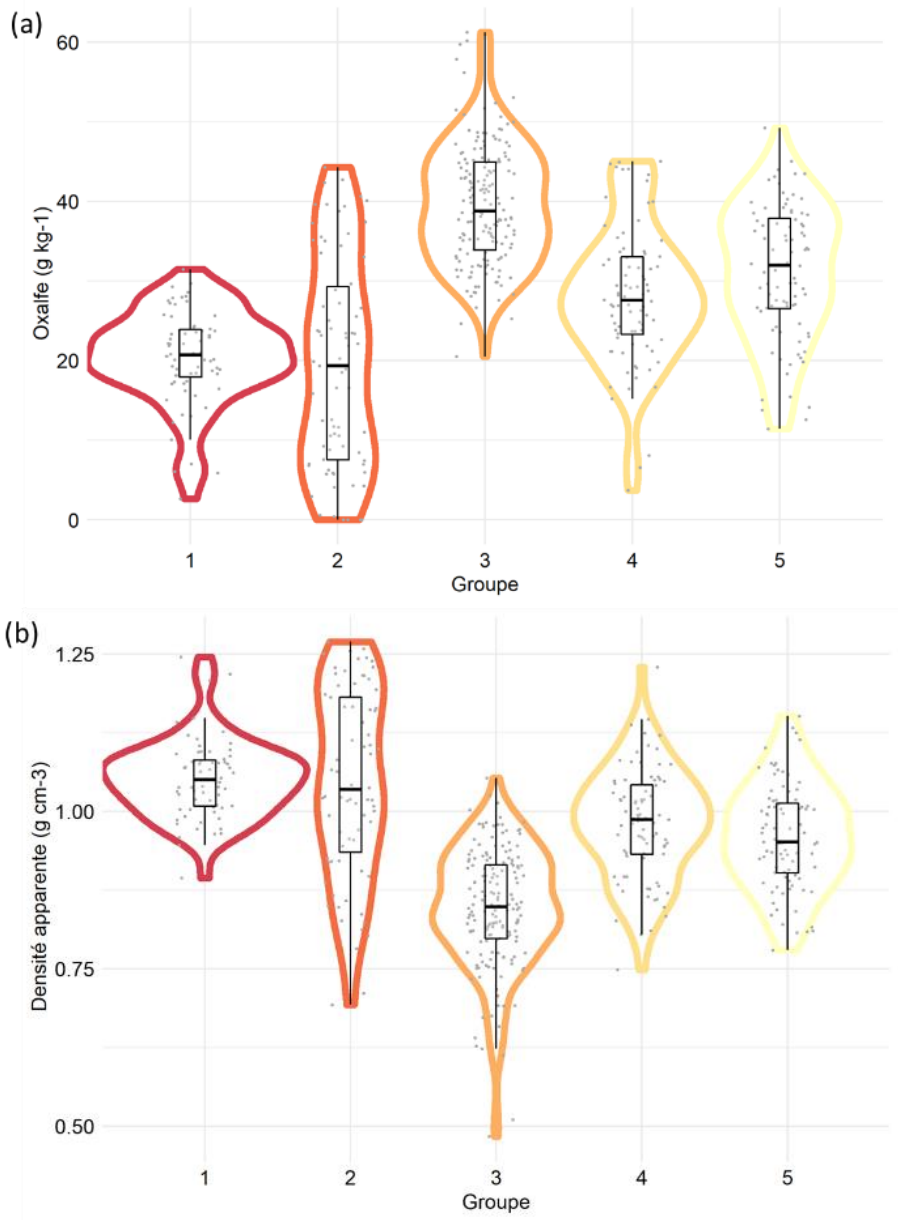


FIGURE 4.12 : INDICATEUR « OXALFE » (G KG^{-1}) (A) ET DENSITE APPARENTE (G CM^{-3}) (B) PAR GROUPE DE SOL A CARACTERE ANDIQUE

L'interprétation des spectres moyens par groupe de sol a permis de séparer les groupes de sol en 3 catégories sur la base de l'analyse des spectres MIR moyens par groupe de sol (Figure 4.13a) et de l'analyse en composante principale des spectres MIR (Figure 4.13b). La gibbsite, reconnaissable à ses quatre bandes d'absorption caractéristiques (3620, 3527, 3464, 3391 cm^{-1}) (Parikh et al., 2014), est présente dans les groupes de sol 1 et 5. Les groupes 2, 3 et 4 ne présentent aucun pic d'absorption entre 3800 cm^{-1} et 2800 cm^{-1}, qui couplé à une absorbance élevée à 1640 cm^{-1} et 1390 cm^{-1} (eau de constitution) traduit la présence d'allophanes (Basile-Doelsch et al., 2005b). L'analyse de l'ACP des spectres MIR (Figure 4.13b) et des produits amorphes (Figure 4.14a) permet de visualiser cette dichotomie sur la composante principale n°1 entre les sols à gibbsite (1 et 5) et les sols à allophanes (3 et 4). Le groupe 2, quant à lui, se détache très bien des autres échantillons sur la deuxième composante de l'ACP.

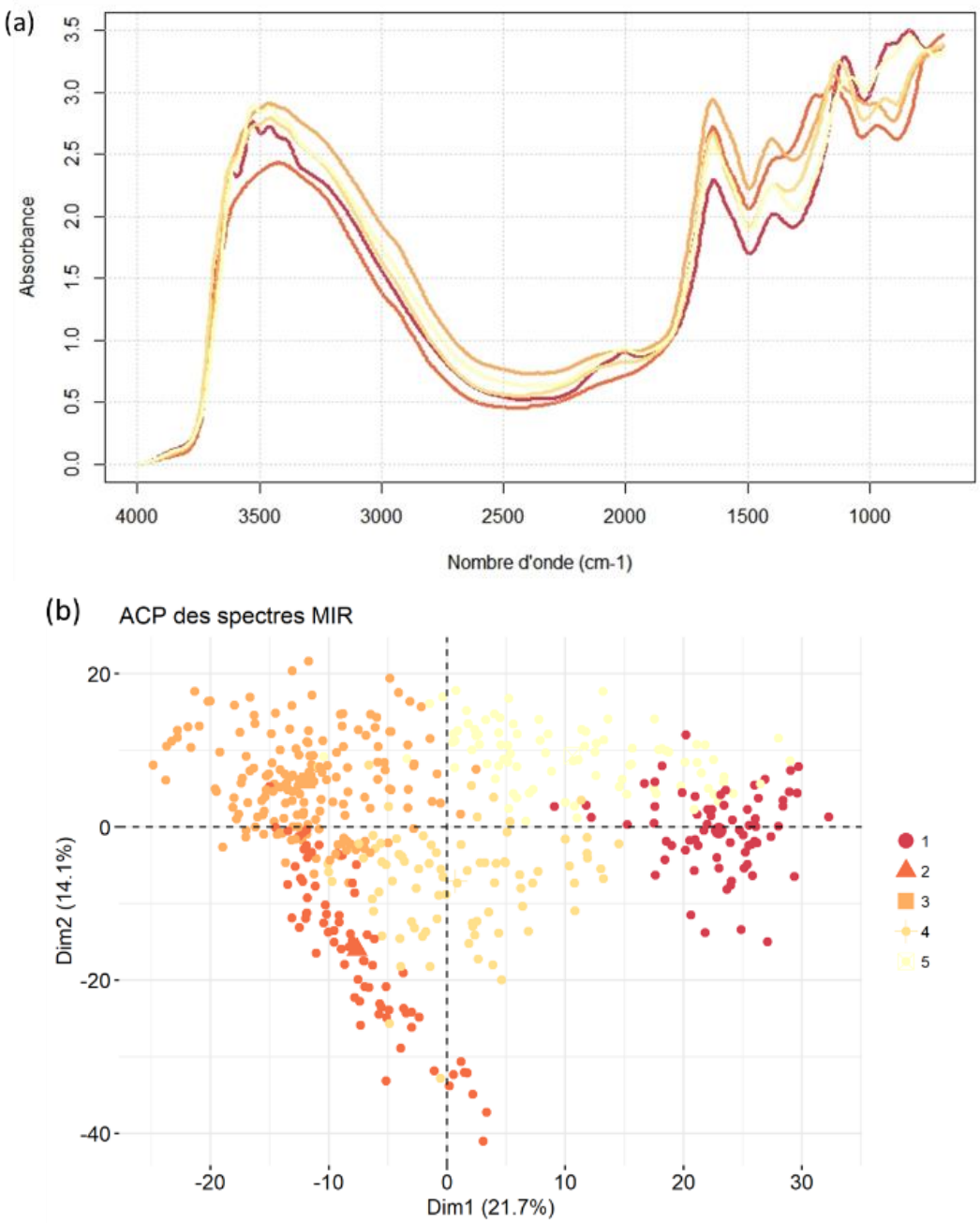


FIGURE 4.13 : SPECTRE MIR MOYEN PAR GROUPE DE SOL (A) ET ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE DES SPECTRES MIR (B) DES SOLS A CARACTERE ANDIQUE

Le groupe de sol 3 présente les teneurs en carbone mesurées au laboratoire de La Réunion les plus élevées, ce qui est confirmé par l'ACP des variables chimiques dont les deux composantes principales (PC) sont le carbone (PC2) et la CEC (PC1) (Figure 4.14b).

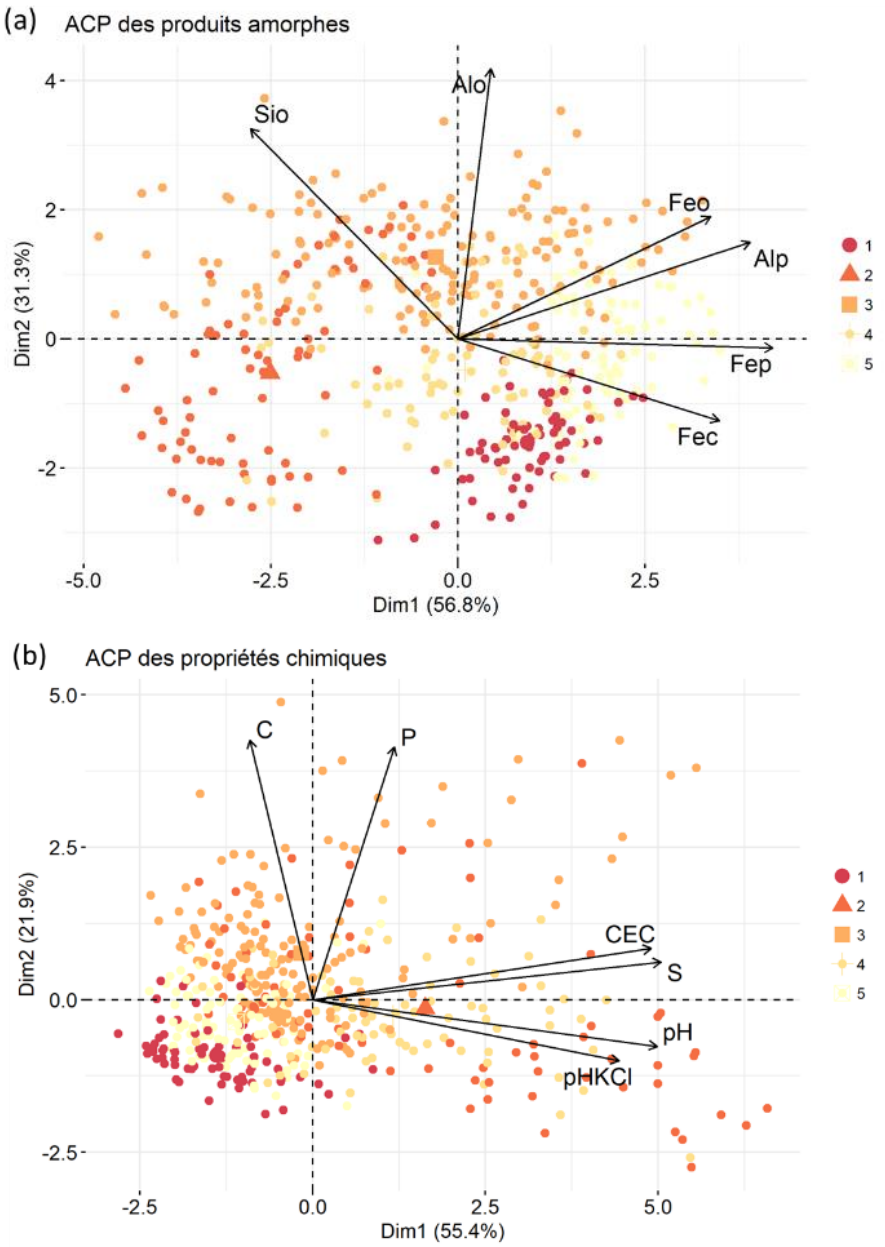


FIGURE 4.14 : ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE DES PRODUITS AMORPHES (A) ET DES VARIABLES CHIMIQUES (B) DES SOLS A CARACTERE ANDIQUE

Les teneurs en carbone (Figure 4.15a) sont plus élevées dans les sols allophaniques (3,4 et 5), notamment le groupe 3 avec des teneurs en carbone globalement supérieures à 50 gC kg^{-1}. Le groupe 2 présente une forte variabilité des teneurs en carbone, liée au caractère andique plus ou moins important, tel que l'indiquait les valeurs de l'indicateur « Oxalfe ». A contrario, le groupe 1, dont le minéral principal est la gibbsite, présente des teneurs en carbone plus faibles que celles des autres groupes. Les sols à gibbsite (groupe 1 et 5) ont une capacité d'échange cationique (CEC) très faible (Figure 4.15b), ce qui est caractéristique de la gibbsite, de formule $Al(OH)_3$ présentant très peu de charges électronégatives à sa surface et donc une faible capacité à adsorber des cations.

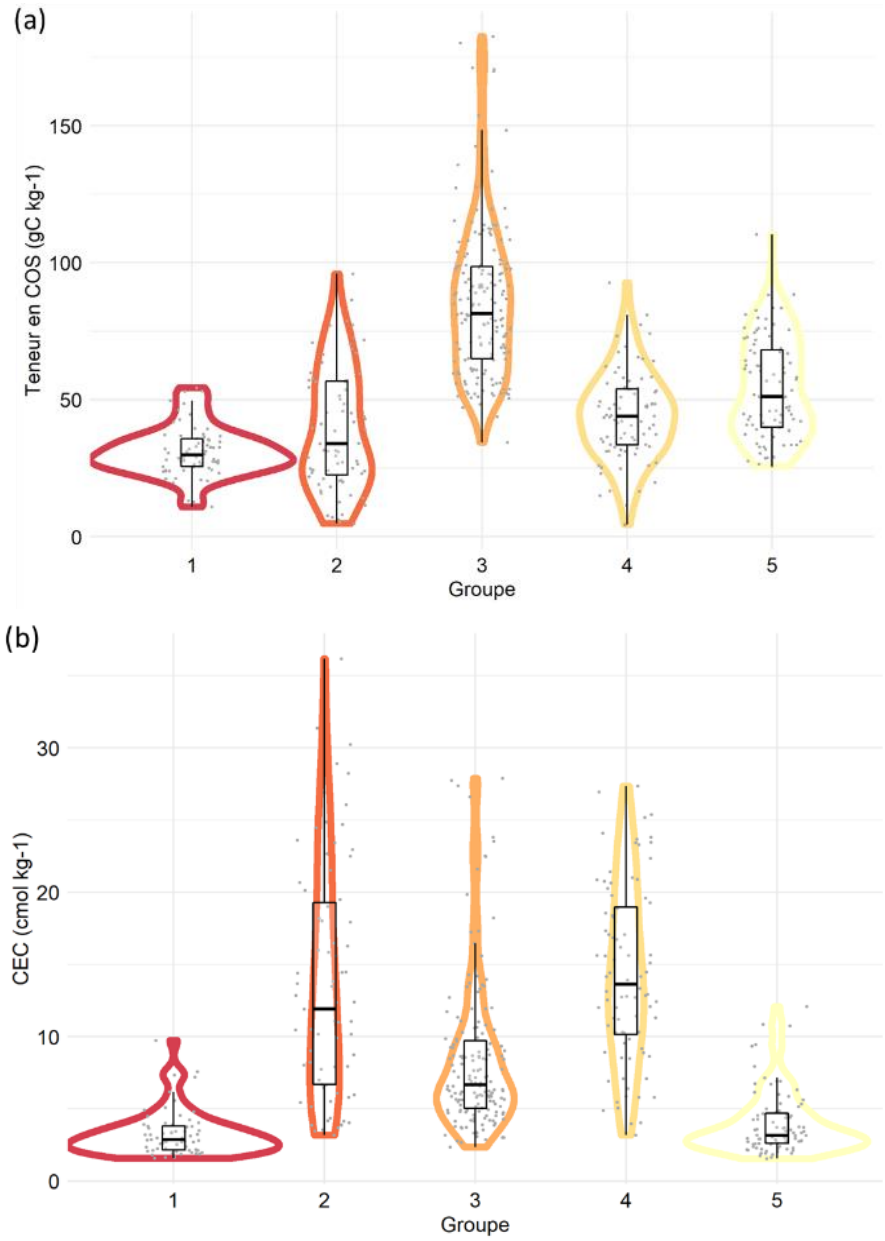


FIGURE 4.15 : TENEURS EN CARBONE ORGANIQUE DU SOL (A) ET CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE (CEC) (B) PAR GROUPE DE SOL A CARACTERE ANDIQUE

D'un point de vue de la répartition spatiale, les groupes de sol à allophanes (3, 4) sont majoritairement présents sur le jeune massif du Piton de La Fournaise à basse altitude à l'Est et au Sud mais aussi dans les Hauts de l'Ouest, sur le massif du Piton des Neiges, où la pluviosité est plus élevée. Les sols à gibbsite (1 et 5) se trouvent en haut de deux topo-séquences au Sud et au Nord de l'île tandis que les sols du groupe 2, très bien détectés par la spectroscopie MIR, correspondent aux sols des cônes de déjection des cirques, principalement à l'Ouest (Rivière Saint-Etienne) et à l'Est sur le cône de déjection de Saint-André (Rivière du Mât) (Figure 4.16).

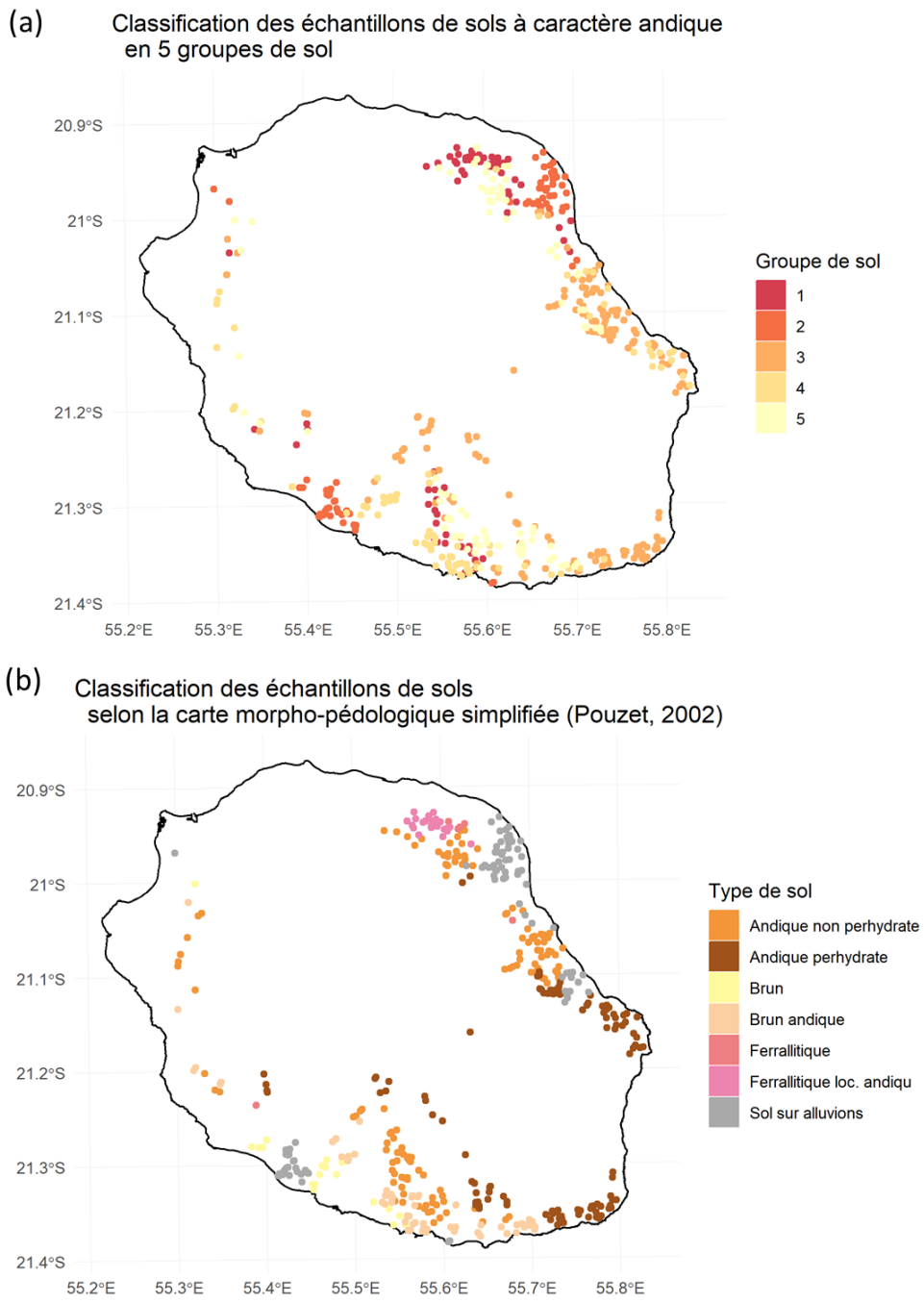


FIGURE 4.16 : CARTOGRAPHIE DES ECHANTILLONS DES GROUPES DE SOL A CARACTERE ANDIQUE (GROUPE DE SOL DE 1 A 5) SELON LA CLASSIFICATION SPECTRALE (A) ET SELON LA CLASSIFICATION MORPHO-PEDOLOGIQUE SIMPLIFIEE (B)

La table de contingence (Tableau 4.4) confirme que les échantillons du groupe de sol 2 correspondent aux sols sur alluvions, dont 75% des échantillons de sol sont classés dans le groupe 2. Tous les autres échantillons de sol sont répartis majoritairement selon les sols andiques ou à caractère andique de la classification morpho-pédologique simplifiée, moins de 15% des échantillons sont classés en sol Brun ou Ferrallitique.

TABLEAU 4.4 : TABLE DE CONTINGENCE ENTRE LA CARTE MORPHO-PEDOLOGIQUE SIMPLIFIEE (POUZET, 2002) ET LES GROUPES DE SOL A CARACTERE ANDIQUE, NUMEROTES DE 1 A 5

Type de sol (Pouzet, 2002)	1	2	3	4	5
Andique non perhydrate	22	1	48	12	49
Andique perhydrate	2	1	76	12	18
Brun	0	6	1	13	1
Brun andique	2	0	12	35	9
Ferrallitique	5	0	0	0	1
Ferrallitique loc. andique	20	0	0	0	5
Sol sur alluvions	3	66	17	2	0

Les sols à caractère andique, définis par cette classification, correspondent donc majoritairement aux sols andiques et à caractère andique de la carte morpho-pédologique (Andiques perhydratés, Andiques non perhydratés, sols bruns andiques et ferrallitiques andiques) ainsi qu'au cas particulier des sols sur alluvions. La répartition de ces échantillons entre les deux classifications est différente en raison des informations minéralogiques et organiques contenues dans les spectres MIR. En effet, ces sols se différencient entre eux en fonction de leur teneur en allophanes, en gibbsite et en carbone organique du sol.

4.1.2.3 Subdivision des sols à caractère non andique (2ème groupe) en 4 groupes par k-medoids

L'indicateur « Oxalfe » (Al_o + ½ Fe_o) est inférieur à 20 g kg^{-1} pour les 4 groupes de sol indiquant que les échantillons de sol de ces 4 groupes n'ont pas de caractère andique (Figure 4.17).

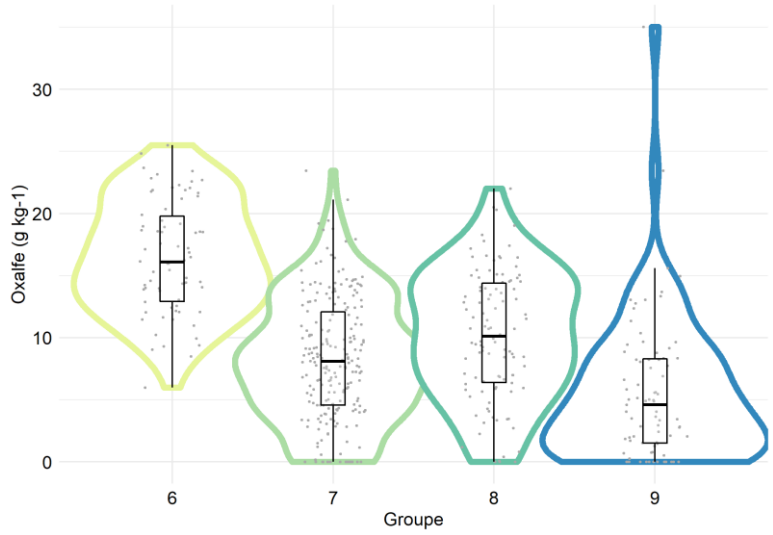


FIGURE 4.17 : INDICATEUR « OXALFE » (G KG^{-1})

L'interprétation des spectres moyens par groupe de sol a permis de mettre en évidence les principaux minéraux présents dans chaque groupe de sol (Figure 4.18a). Les bandes d'absorption à 3695 et 3620 cm^{-1} correspondant aux vibrations d'élongation Al_2OH, présentes ici à 3675 et 3626 cm^{-1}, et la bande d'absorption à 920 cm^{-1}, observée ici à 930 cm^{-1}, correspondant à une déformation angulaire de Al_2OH (Joussein et al., 2005), sont caractéristiques de l'halloysite (Joussein et al., 2005) et sont présentes dans les 4 groupes de sol. L'absence d'un pic à 3675 cm^{-1} mais un simple épaulement pour les spectres moyens des groupes 6, 8 et 9 pourrait indiquer la présence d'halloysite hydratée (halloysite 10Å) en

raison de vibrations d'élongation réduites des liaisons OH des hydroxyles libres ou des OH de surface par l'intercalation d'eau entre les feuillets (Hidalgo et al., 2010) comparativement à l'halloysite déshydratée (halloysite 7Å) probablement présente dans le groupe 7. Le groupe 6 se démarque par la présence de gibbsite, reconnaissable à ses trois bandes d'absorption caractéristiques (3527, 3464, 3391 cm^{-1}) (Parikh et al., 2014) en plus de la bande d'absorption à 3620 cm^{-1}.

L'ACP des spectres MIR (Figure 4.18b) et l'ACP des produits amorphes (Figure 4.19a) montre une différenciation assez nette des différents groupes de sol sur la première composante principale d'un pôle gibbsitique (groupe 6) à un pôle halloysitique (groupe 7, 8 et 9). Le groupe 9 se démarque sur la deuxième composante de l'ACP des spectres MIR bien que l'interprétation des spectres ne montrait que peu de différence avec le groupe 8 et 7.

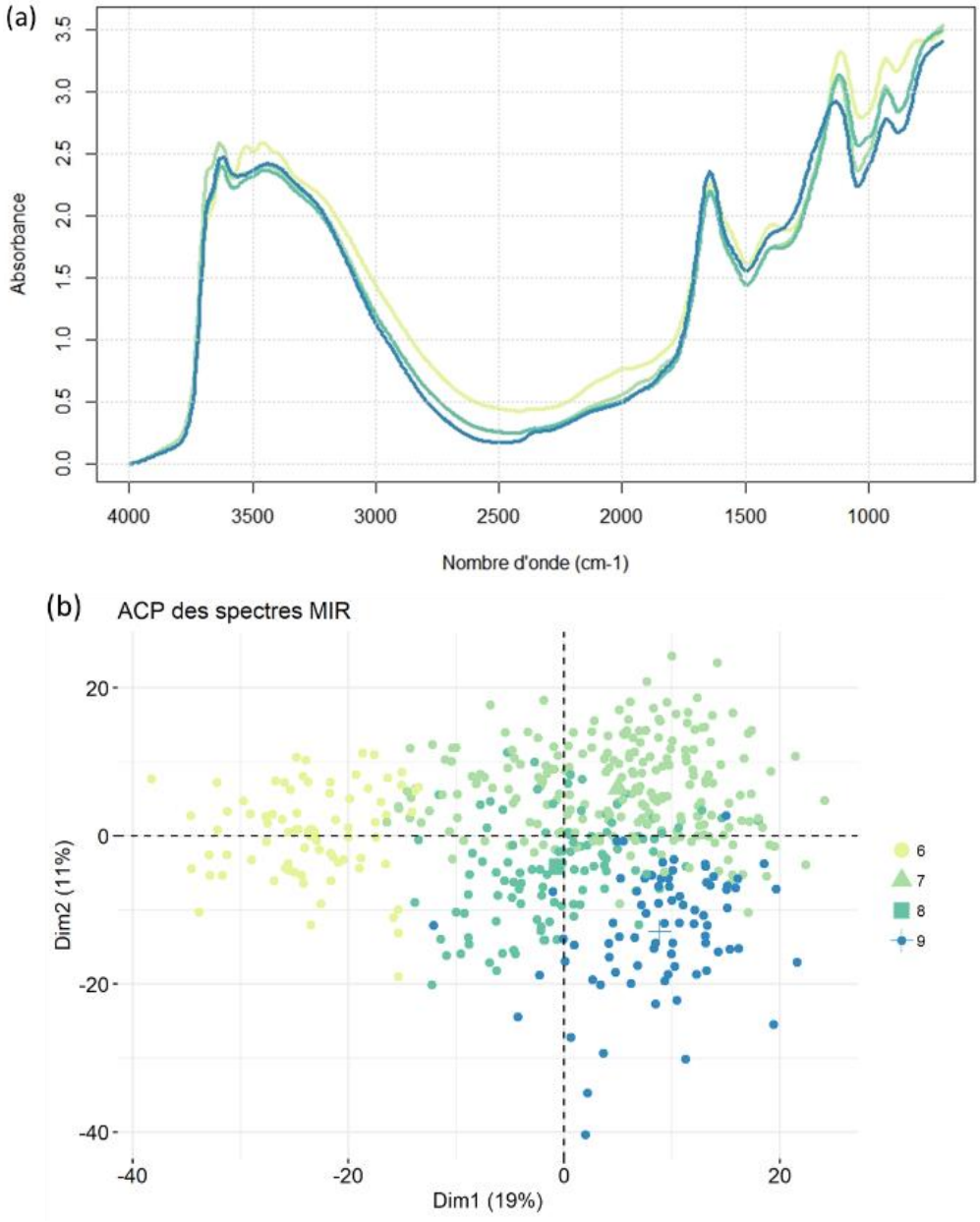


FIGURE 4.18 : SPECTRE MIR MOYEN PAR GROUPE DE SOL (A) ET ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE DES SPECTRES MIR (B) DES SOLS A CARACTERE NON ANDIQUE

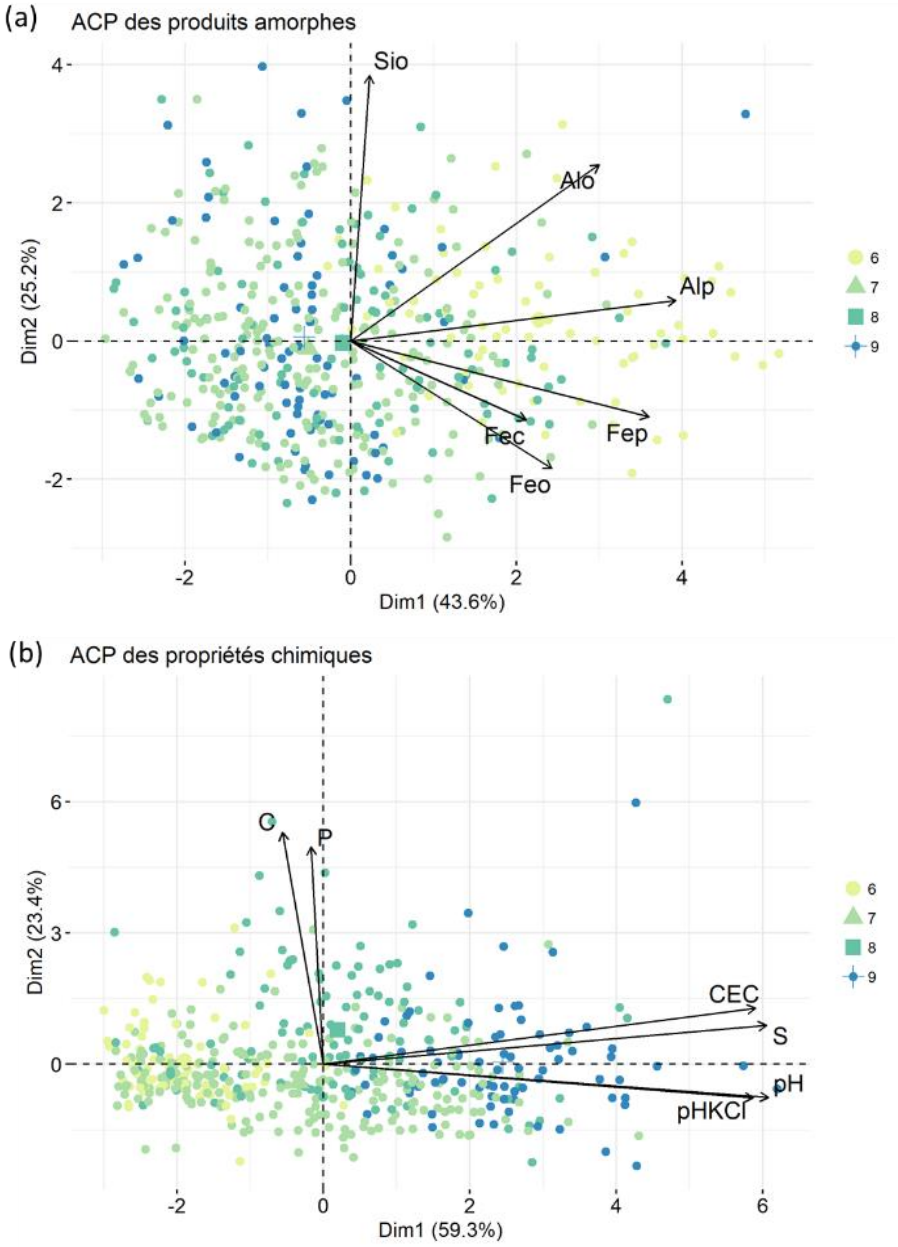


FIGURE 4.19 : ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE DES PRODUITS AMORPHES (A) ET DES VARIABLES CHIMIQUES (B) DES SOLS A CARACTERE NON ANDIQUE

L'ACP des variables chimiques (Figure 4.19b) montre également une différenciation des groupes de sol selon la première composante principale liée à la capacité d'échange cationique. En effet, l'analyse des propriétés chimiques des 962 échantillons de sol issues des analyses du laboratoire de La Réunion, montre des teneurs en carbone similaires (Figure 4.20a) mais une différenciation entre les différents groupes de sol par leur capacité d'échange cationique (CEC) (Figure 4.19b ; Figure 4.20b).

Le groupe 6, sol à gibbsite, présente les CEC les plus faibles (Figure 4.20b) induites par la présence de la gibbsite, de formule $Al(OH)_3$ ayant très peu de charges électronégatives à sa surface et donc une faible capacité à adsorber des cations tandis que le groupe 9 présente les CEC les plus élevées. La CEC plus élevée des sols du groupe 9 pourrait indiquer la présence d'argiles 2:1 ou 2:1:1 en mélange ou sous forme de couche interstratifiées avec l'halloysite, situation où la CEC peut atteindre

théoriquement 60 cmol kg^{-1} (Legros, 2007; Norrish, 1995). De plus, ces sols sont situés en bas du versant Ouest, sur l'ancien massif du Piton des Neiges, où la saison sèche est très marquée, ce qui pourrait expliquer la formation de ce type d'argile. Or, il est très difficile d'identifier des bandes d'absorption spécifiques dans le moyen infra-rouge de ce type de mélange (Delvaux et al., 1990) ce qui explique des spectres MIR moyens très similaires entre les groupes de sol 7, 8 et 9 mais qui sont différenciés sur l'ACP des spectres et l'ACP des variables chimiques, notamment selon la CEC. D'autre part, la différence des CEC observées entre les groupes 7 et 8 est un nouvel argument pour une distinction entre halloysite déshydratée et hydratée puisque la CEC de l'halloysite augmente avec le degré d'hydratation (Grim, 1968; Joussein et al., 2005; Norrish, 1995). De manière plus générale, les CEC des sols à halloysite observées dans ce jeu de données sont assez élevées et semblent s'expliquer par le climat tropical (Joussein et al., 2005) et la présence probable d'argiles 2 :1 ou 2:1:1 (Delvaux et al., 1990; Joussein et al., 2005; Quantin et al., 1984).

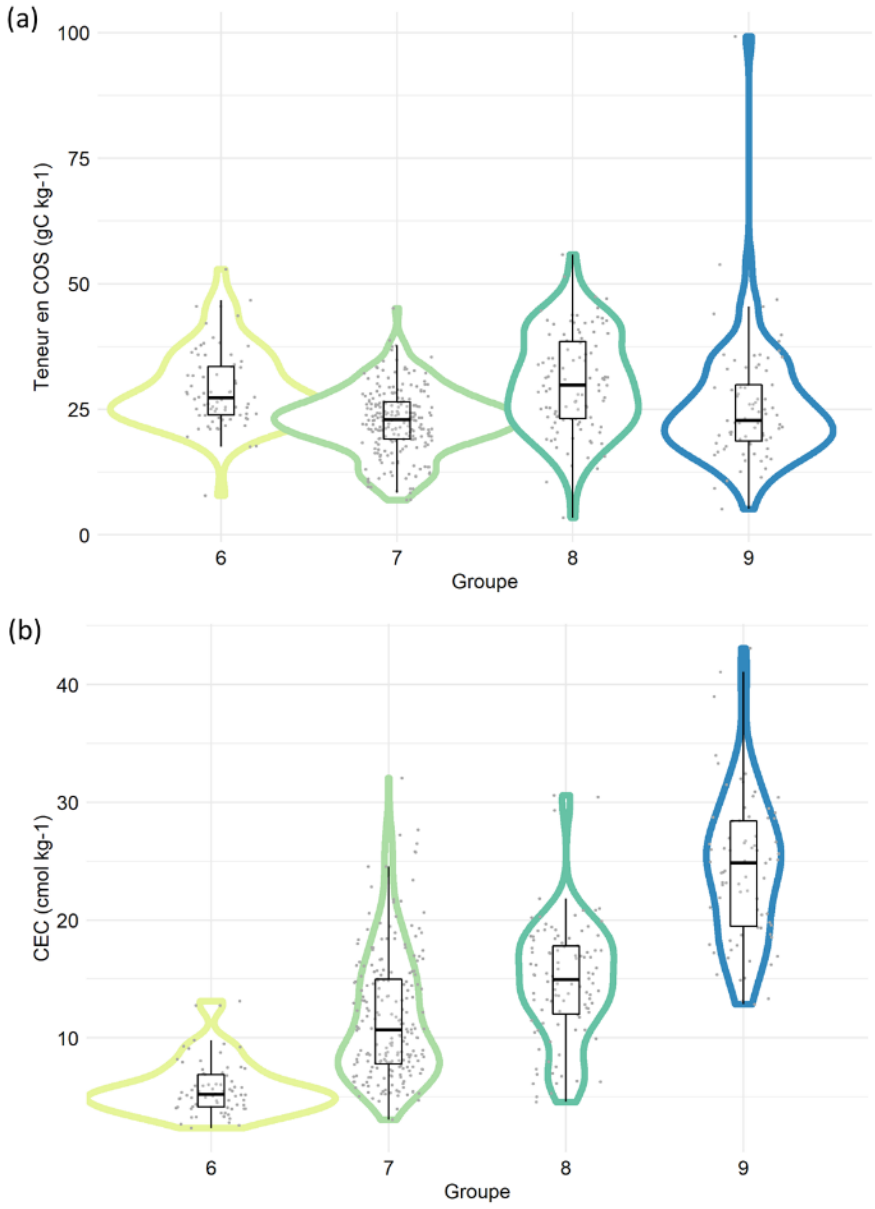


FIGURE 4.20 : TENEURS EN CARBONE ORGANIQUE DU SOL (A) ET CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE (CEC) (B) PAR GROUPE DE SOL A CARACTERE NON ANDIQUE

D'un point de vue de la répartition spatiale (Figure 4.21), les groupes de sols 6, 7, 8 et 9 sont situés en bas de versant et majoritairement sur le massif du Piton des Neiges. Les échantillons de sols sur le massif du Piton de La Fournaise se situent sur les coulées les plus anciennes du massif, au Sud-Ouest de l'île. La formation d'halloysite à partir des roches volcaniques est effectivement le résultat d'une pédogenèse assez longue avec un climat moins humide que dans les Hauts, le Sud et l'Est de l'île, dont la pluviosité est très élevée. La localisation du groupe 6 (sol à gibbsite) est très localisée, au Nord et au Sud-Ouest de l'île, à l'interface avec les sols à caractère andique avec présence de gibbsite (groupe 5). Les groupes de sol 7 et 8 (halloysite déshydratée et hydratée) regroupe un grand nombre des échantillons de sol situés dans toutes les zones où l'on retrouve ces sols à halloysite tandis que les sols du groupe 9 (halloysite et interstratifiés) sont localisés à l'Ouest, en bas de versant, dans les zones les plus sèches où la pédogenèse peut conduire à la formation d'interstratifiés.

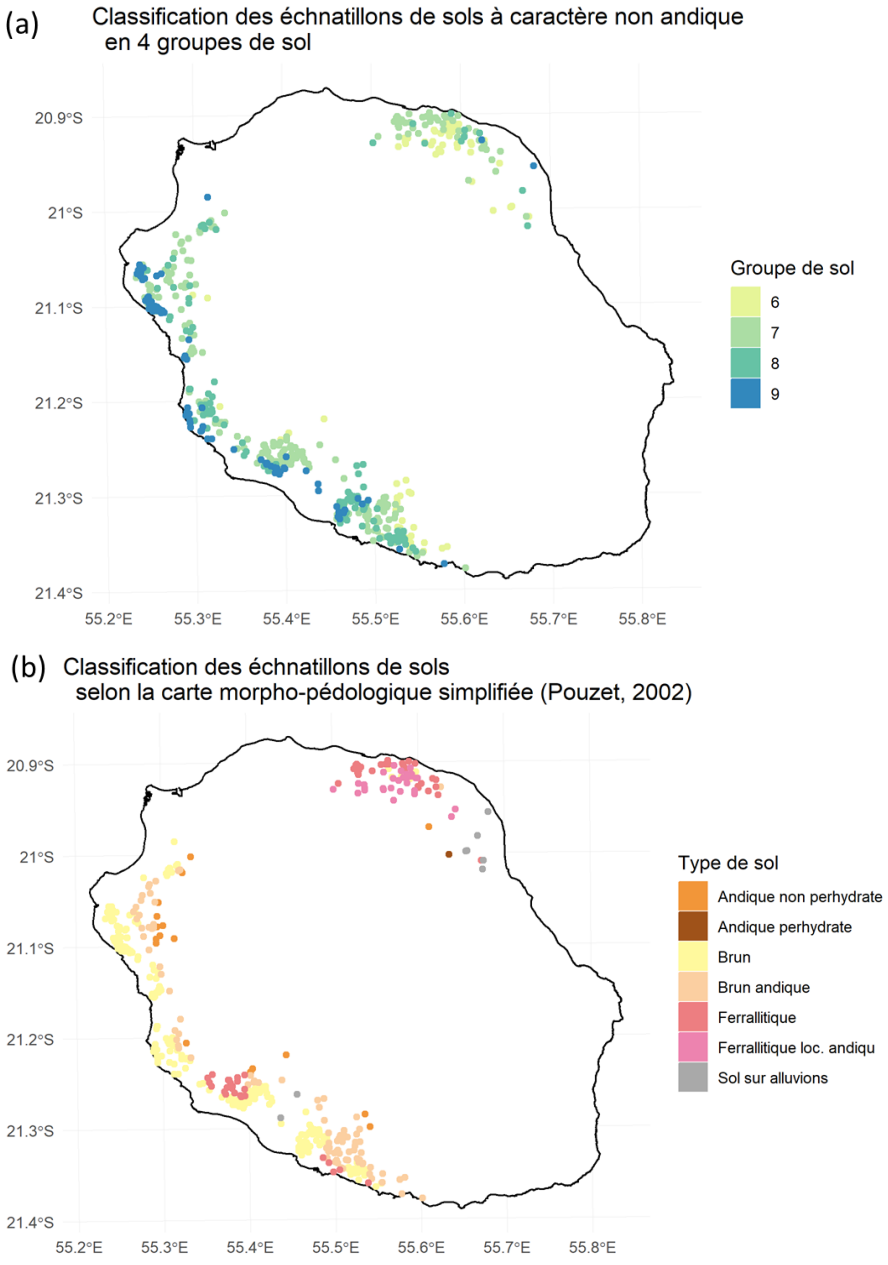


FIGURE 4.21 : CARTOGRAPHIE DES ECHANTILLONS DES GROUPES DE SOL A CARACTERE NON ANDIQUE (GROUPE DE SOL DE 6 A 9) SELON LA CLASSIFICATION SPECTRALE (A) ET SELON LA CLASSIFICATION MORPHO-PEDOLOGIQUE SIMPLIFIEE (B)

La table de contingence (Tableau 4.5) indique également que les sols du groupe 6 sont en majorité des sols classés comme Ferrallitique localement andique et Brun andique donc en bas de topo-séquence, à l'interface avec les sols andiques dans la classification de la carte morpho-pédologique et avec le groupe 5 de la classification spectrale caractérisée par un caractère andique avec présence importante de gibbsite. Les sols du groupe 8 et 9 correspondent majoritairement à des sols Bruns. Le groupe 7 est, quant à lui, plus dispersé et les échantillons se répartissent dans les sols Bruns, Bruns andique et Ferrallitique.

TABLEAU 4.5 : TABLE DE CONTINGENCE ENTRE LA CARTE MORPHO-PEDOLOGIQUE SIMPLIFIEE (POUZET, 2002) ET LES GROUPES DE SOL A CARACTERE ANDIQUE, NUMEROTES DE 6 A 9

Type de sol (Pouzet, 2002)	6	7	8	9
Andique non perhydraté	8	6	4	0
Andique perhydraté	1	0	0	0
Brun	8	81	65	69
Brun andique	15	54	20	2
Ferrallitique	4	41	9	1
Ferrallitique loc. andique	21	7	2	0
Sol sur alluvions	3	1	2	2

Les sols à halloysite correspondent donc majoritairement aux sols bruns et ferrallitiques mais selon une répartition différente et basée sur l'information minéralogique contenue dans les spectres MIR. En effet, ces sols se différencient entre eux en fonction de la présence ou absence de gibbsite, d'halloysite et d'interstratifiés dont les caractéristiques modifient les propriétés d'échange, et que l'on peut mettre en évidence grâce à l'analyse de la CEC de chacun des groupes de sol issus de la classification spectrale.

Cette classification non supervisée par partitionnement k-medoids à partir de spectres MIR a donc permis de classer les 962 échantillons de sol en 9 groupes de sol, homogènes d'un point de vue spectral. La description de ces 9 groupes est reprise dans l'article correspondant à la seconde partie de ce chapitre.

4.1.3 Spatialisation des unités pédologiques spectrales

4.1.3.1 Définition de la zone d'étude

La première étape dans la spatialisation des unités pédologiques spectrales est la définition d'une zone d'étude dont l'objectif est d'englober la majorité des surfaces agricoles afin de pouvoir leur affecter une unité pédologique spectrale. La zone d'étude a été définie selon les contours des zones agricoles où les 962 points du jeu de données utilisés pour la classification spectrale non supervisée étaient présents. Les zones des Hauts de l'Ouest et de la plaine des Cafres, ayant pas ou très peu de points, ont été inclues dans la zone d'étude car les types de sol sont les mêmes que ceux des points situés plus bas en altitude. Certaines zones, n'ayant pas d'échantillon de sol géoréférencé avec un spectre MIR, ont été exclues pour la représentation cartographique mais représentent de faibles surfaces agricoles (Nord de l'île, les cirques de l'île, prairies de pâture sur le massif du Piton de La Fournaise) (Figure 4.22a).

Afin de traduire le semis de points des échantillons de sols en unités surfaciques, la transformation des points en polygones a été réalisée par la méthode des polygones de Voronoï à partir des 962 points pour lesquels un groupe de sol a été attribué par la classification spectrale par partitionnement k-medoids (Figure 4.22b).

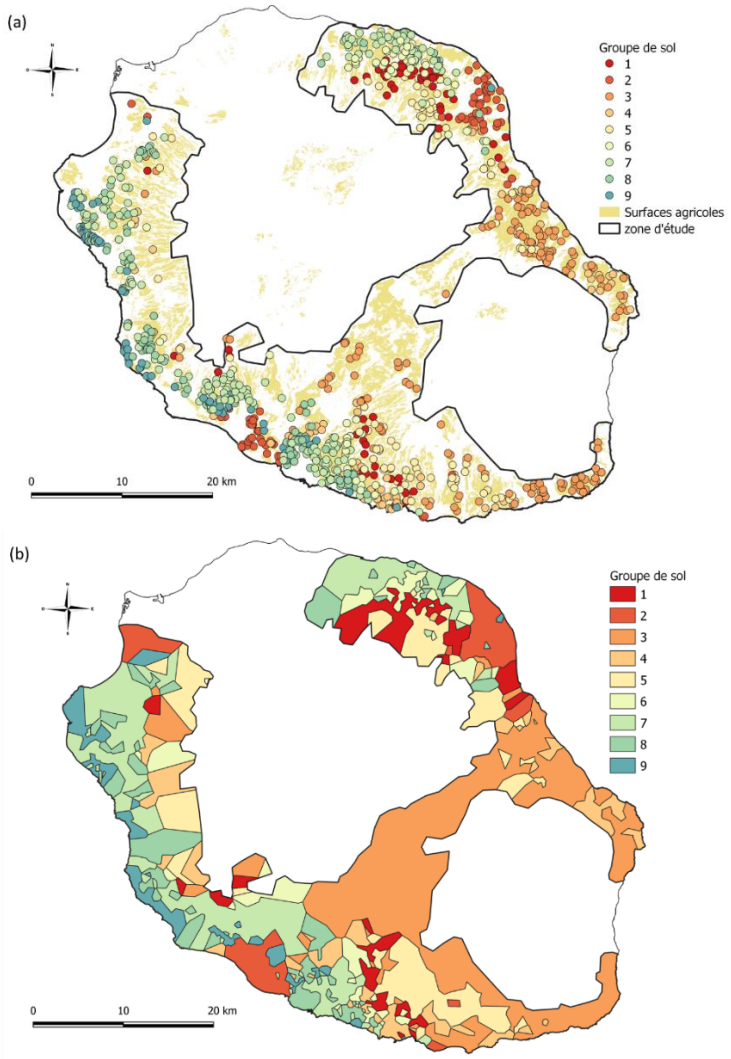


FIGURE 4.22 : ZONE D'ETUDE (A) ET UNITES PEDOLOGIQUES SPECTRALES CARTOGRAPHIEES A PARTIR DES 962 POINTS DU JEU DE DONNEES AYANT UN SPECTRE MIR ET UN GROUPE DE SOL ASSOCIE (B)

4.1.3.2 Méthodologie de spatialisation par Random Forest

Cependant, afin de délimiter plus précisément les contours géographiques des unités pédologiques spectrales issues de la classification k-medoids non supervisée sur les 962 échantillons de sol, les autres échantillons de sol (7780 échantillons) de la base de données contenant 8742 échantillons de sols géoréférencés ont été utilisés afin d'augmenter la densité de points, et ainsi la précision des cartes produites. L'objectif est d'utiliser un algorithme Random Forest (RF) (Liaw and Wiener, 2002) pour prédire un groupe de sol aux 7780 échantillons restants de cette base de données (Tableau 4.6).

TABLEAU 4.6 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES VARIABLES CHIMIQUES DES 7780 ECHANTILLONS DE SOL

	C	N	pH	pH_{KCl}	P_{Olsen}	CEC	Ca	Mg	K	Na
	gC kg^{-1}	gN kg^{-1}			mg kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}
Min.	2,82	0,00	3,70	3,50	1,00	0,24	0,00	0,01	0,01	0,00
Q1	25,6	2,25	4,97	4,30	76,09	5,52	1,48	0,92	0,18	0,07
Médiane	35,56	3,00	5,40	4,60	153,00	8,46	3,45	2,07	0,39	0,13
Q3	61,13	4,90	5,91	5,05	305,96	13,30	6,95	3,97	0,84	0,21
Max.	199,00	19,70	9,06	8,26	6131,06	49,40	31,70	29,20	28,60	7,02
Moyenne	46,05	3,81	5,50	4,75	246,47	10,15	4,76	2,89	0,62	0,19
Ecart-type	28,32	2,21	0,75	0,61	311,40	6,44	4,28	2,84	0,79	0,25

La base d'apprentissage a été constituée par les 962 échantillons classés par l'algorithme k-medoids. Les prédicteurs ont été sélectionnés par expertise en fonction de leur rôle dans la pédogenèse : 2 variables qualitatives (âge et type des matériaux parentaux géologiques et nombre de mois peu pluvieux) et 10 variables quantitatives (C, N, pH, pHKCl, CEC, et somme des bases, altitude et pente, pluie médiane annuelle et température moyenne annuelle). Un test de corrélation des variables quantitatives (Figure 4.23a) a été réalisé afin de supprimer les variables fortement corrélées ($r > 0.8$) (N, pH, Somme des bases, température annuelle moyenne) pour ne pas biaiser l'algorithme de Random Forest (RF), très sensible aux variables prédictives corrélées. La prédiction des groupes de sol a été réalisée sur les 7780 échantillons de sol restants de la base de données.

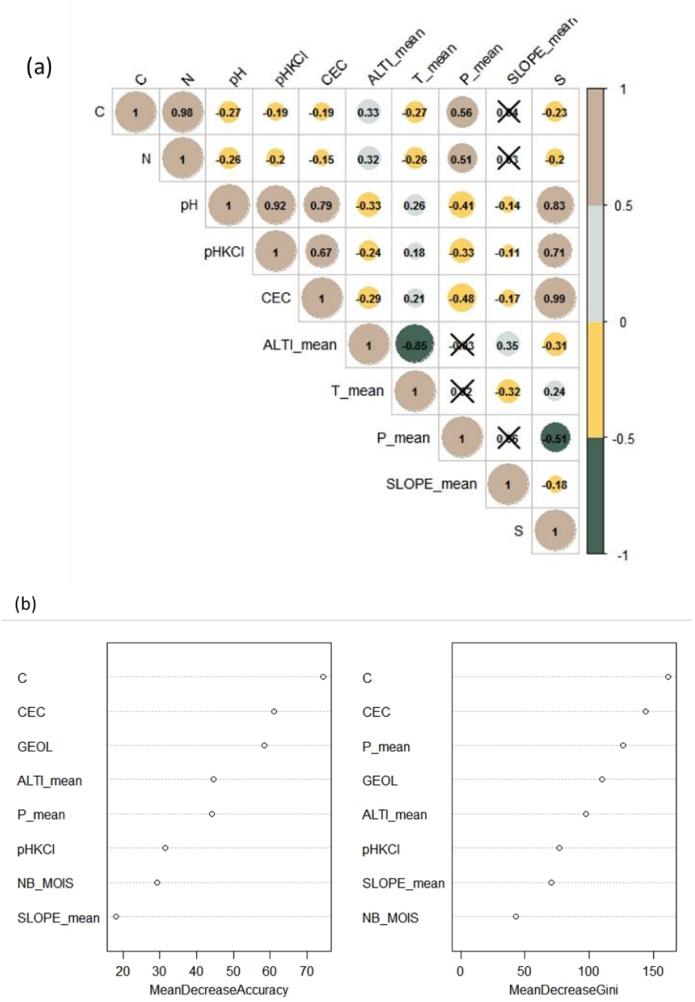


FIGURE 4.23 : CORRELOGRAMME DES CO-VARIABLES (A) ET HIERARCHISATION DE L'IMPORTANCE DES CO-VARIABLES DANS LE MODELE RANDOMFOREST (B)

Le modèle RandomForest (RF) permet également de déterminer et hiérarchiser les variables les plus importantes (Figure 4.23b). Le carbone et la CEC sont les variables les plus importantes dans la construction du modèle, montrant ainsi que les groupes de sol se différencient par leur teneur en carbone et leur CEC. La géologie, très liée aux types de sol dans ce contexte de pédogenèse volcanique tropicale est également très importante dans la construction du modèle. La variable climatique (pluie médiane annuelle), très liée à l'altitude, sont les co-variables suivantes dans l'ordre d'importance. Ces résultats sont en accord les descriptions des groupes de sol de la classification spectrale et des déterminants du COS. L'erreur estimée par les « out-of-bag » du modèle (fraction du jeu de données

non tirée aléatoirement pour créer un arbre à chaque itération), construit sur les 962 échantillons de sol pour lesquels un groupe de sol a été défini par la classification spectrale non supervisée, est de 28.48%. La matrice de confusion et l'erreur estimée par groupe de sol permet de visualiser les groupes du sol étant plus ou moins bien prédits par l'algorithme (Tableau 4.7). Etant donné que l'objectif est de délimiter plus précisément les contours géographiques des unités pédologiques spectrales à l'aide du RF, ce taux d'erreur, pourtant assez élevé, est considéré comme acceptable.

TABLEAU 4.7 : MATRICE DE CONFUSION (GROUPE DE SOL MESURE VS. PREDIT) ET ERREUR ESTIMEE PAR GROUPE DE SOL SUR LES 962 D'ECHANTILLONS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Erreur estimée par groupe de sol
1	45	4	1	1	9	6	2	0	0	0.34
2	0	65	5	0	1	0	0	0	4	0.13
3	0	4	153	5	6	0	0	0	0	0.09
4	3	2	15	44	4	3	1	9	3	0.48
5	9	0	17	5	56	1	0	0	0	0.36
6	11	2	0	5	0	42	12	2	0	0.43
7	1	0	0	0	0	9	182	15	15	0.18
8	0	1	0	7	0	3	43	47	5	0.56
9	0	2	0	3	0	0	12	6	54	0.30

Le modèle RandomForest a ensuite permis d'affecter un groupe de sol aux 7780 échantillons du jeu de données, à partir des co-variables. Les 962 points du jeu de données avec un groupe de sol attribué par la classification spectrale et les 7780 points du jeu de données avec un groupe de sol prédit par RF sont regroupés pour former un jeu de données global de 8742 points (Figure 4.24).

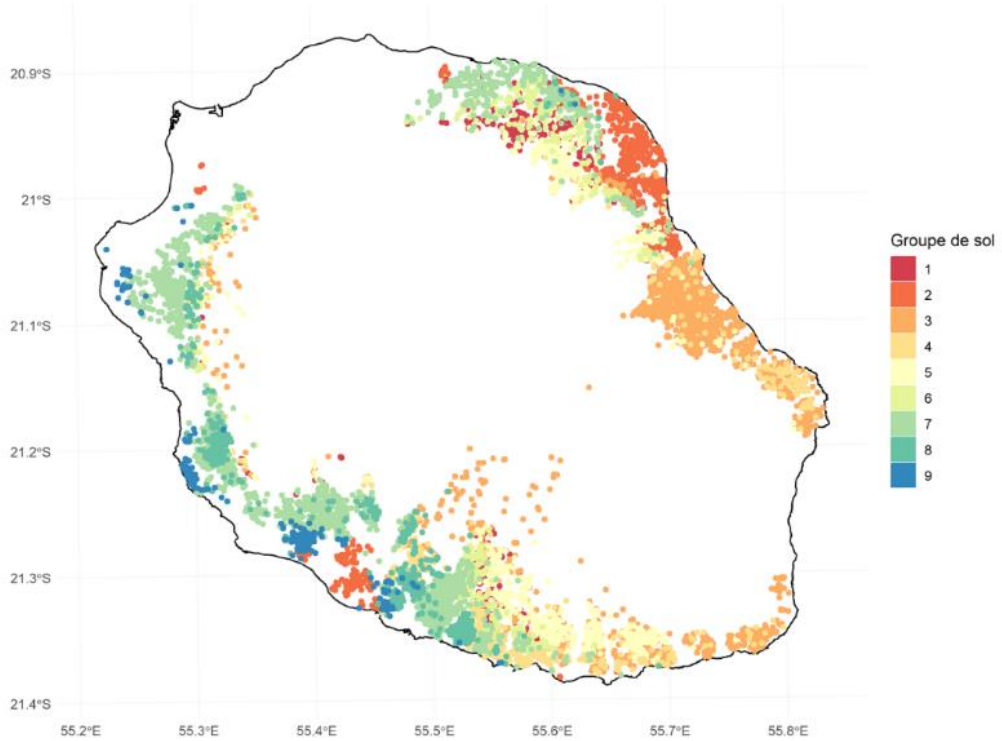


FIGURE 4.24 : CARTOGRAPHIE DES 8742 ECHANTILLONS DE SOL SELON LEUR GROUPE DE SOL

L'analyse des propriétés chimiques et en particulier des teneurs en COS, différenciant les groupes de sol, à la fois avec la classification non supervisée et avec le modèle RandomForest, montre effectivement des variations similaires entre les groupes de sols prédits pour les 7780 échantillons de sol et les groupes de sol mesurés pour les 962 échantillons de la classification spectrale (Figure 4.25).

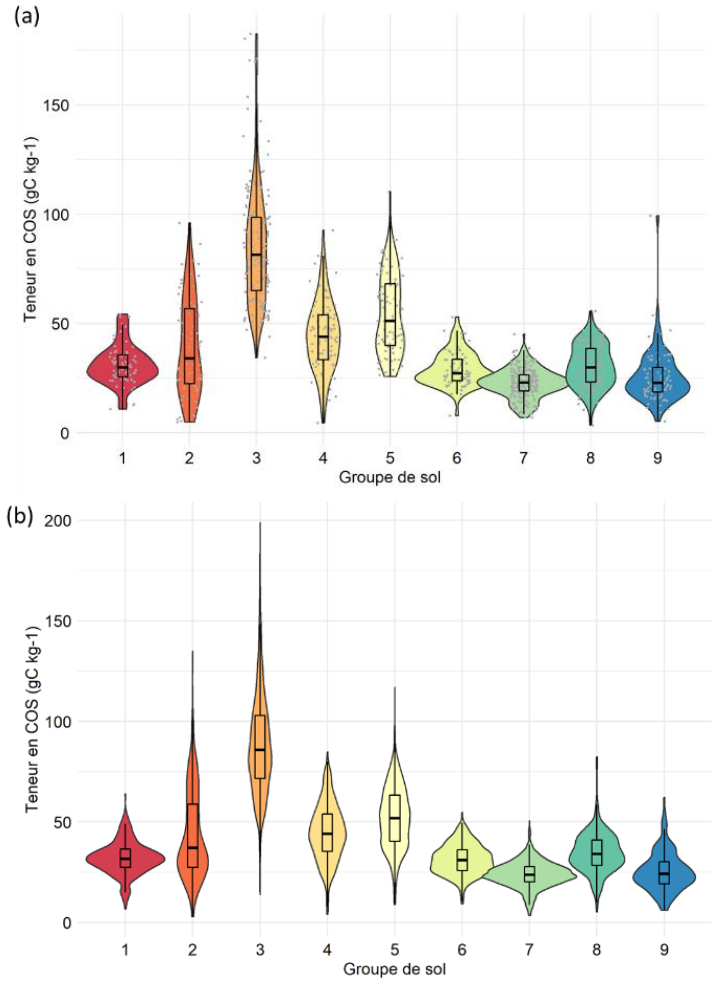


FIGURE 4.25 : BOXPLOT DES TENEURS EN CARBONE (GC KG^{-1}) DES 962 (A) ET DES 7780 ECHANTILLONS (B) PAR GROUPE DE SOL

La spatialisation par polygone de Voronoï est la dernière étape pour cartographier les unités pédologiques spectrales. Nous avons eu recours à des polygones de Voronoï pour transformer l'information ponctuelle de groupe de sol sous forme de polygones et ainsi délimiter les contours géographiques d'unités pédologiques. La géolocalisation des échantillons permet de définir des cellules de Voronoï qui partitionnent le territoire en autant de polygones qu'il y a d'échantillons de sol. Chaque polygone est défini tel que chaque point à l'intérieur du polygone est plus proche de l'échantillon se situant à l'intérieur du polygone que des autres échantillons (Figure 4.26). Cette méthode a été appliquée aux 8742 échantillons de sol géoréférencés de la base d'analyses de sol avec le logiciel open source QGIS 3.8 (QGIS Development Team, 2019).

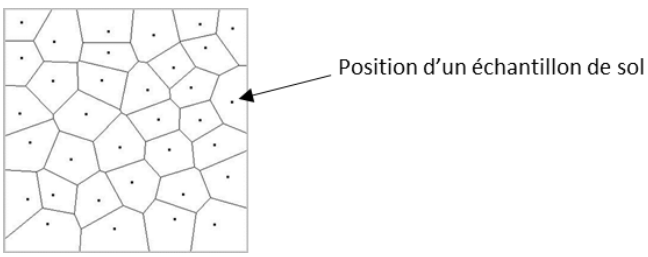


FIGURE 4.26 : PARTITIONNEMENT DE L'ESPACE EN CELLULES DE VORONOÏ

Cependant, la carte ainsi créée (Figure 4.27a) présente une mosaïque de très petites unités de sol enclavées dans d'autres unités de sol. Ce sur-fractionnement est dû à la variabilité kilométrique voire hectométrique des types de sol à La Réunion. Une simplification a été opérée en supprimant les points à l'origine de ces petites unités de sol, dans la limite de surface maximale de 50ha ; 7222 points ont ainsi été conservés pour cartographier les unités pédologiques spectrales par la méthode des polygones de Voronoï (Figure 4.27b).

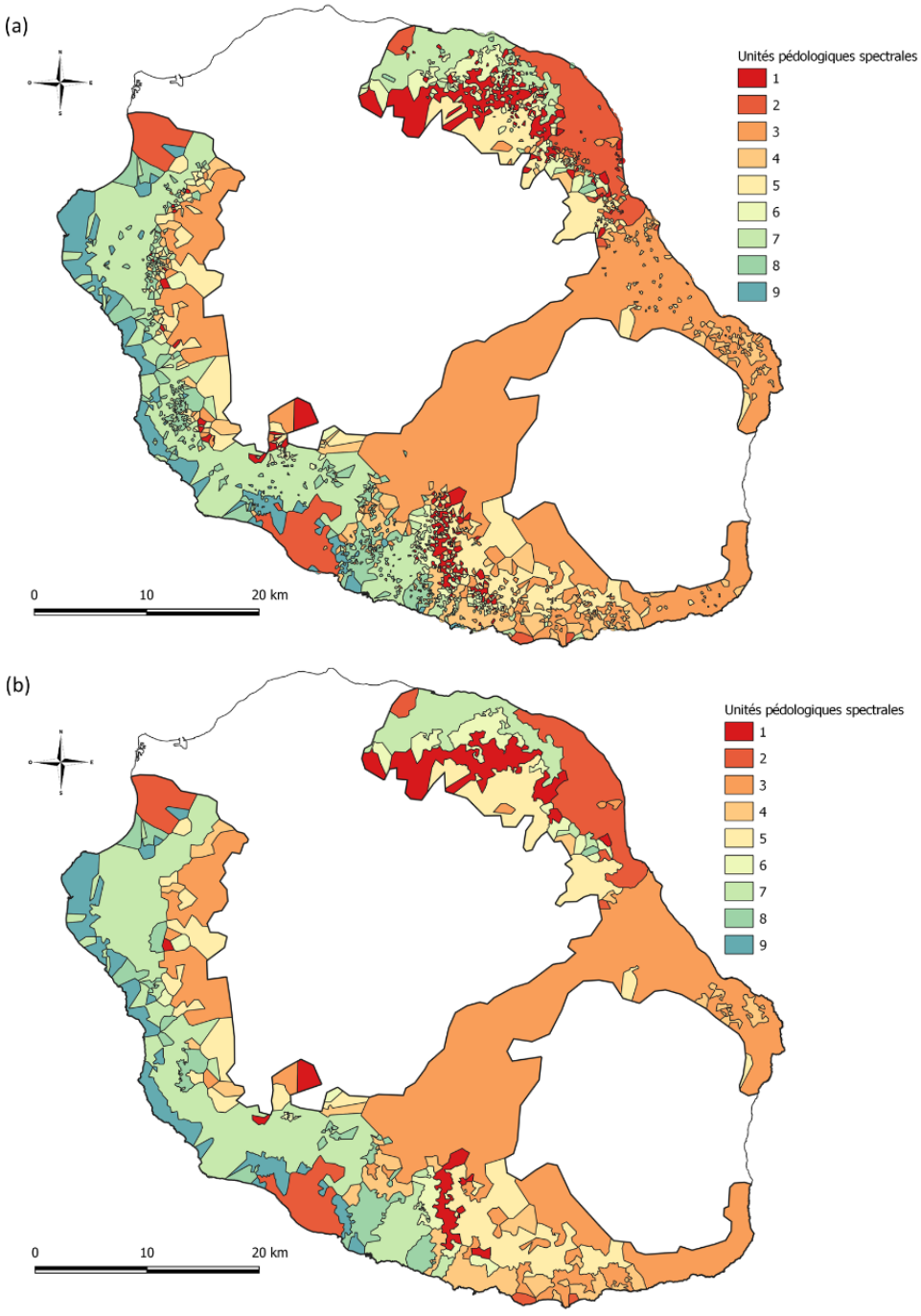


FIGURE 4.27 : CARTOGRAPHIE DES UNITES PEDOLOGIQUES SPECTRALES A PARTIR DES 8742 ECHANTILLONS (A) ET DES 7222 ECHANTILLONS (B)

4.1.3.3 Comparaison des méthodes de spatialisation

Les différentes méthodes de cartographie des unités pédologiques spectrales par polygone de Voronoï : à partir de la classification spectrale « UPScs » (962 points) (Figure 4.22b), du Random Forest « UPSrf » (8742 points) (Figure 4.27a)ou à partir du Random Forest simplifié « UPSrfs » (7222 points) (Figure 4.27b) montrent des différences d'effectifs par groupe de sol (Tableau 4.8, Figure 4.28). En effet, la Figure 4.28 montre une répartition des échantillons par unité pédologique spectrale, à partir du Random Forest simplifié, correspondant majoritairement (> 70%) aux unités pédologiques spectrales définies à partir du Random Forest sans simplification.

TABLEAU 4.8 : EFFECTIFS PAR UNITE PEDOLOGIQUE SPECTRALE REALISEES SUIVANT LES 3 METHODES DE CARTOGRAPHIE

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
UPSrf (8742)	552	820	1808	769	931	609	2300	660	293
UPSrfs (7222)	522	884	1866	614	1008	508	2450	595	295
UPScs (962)	680	686	1609	784	1144	656	1932	951	300

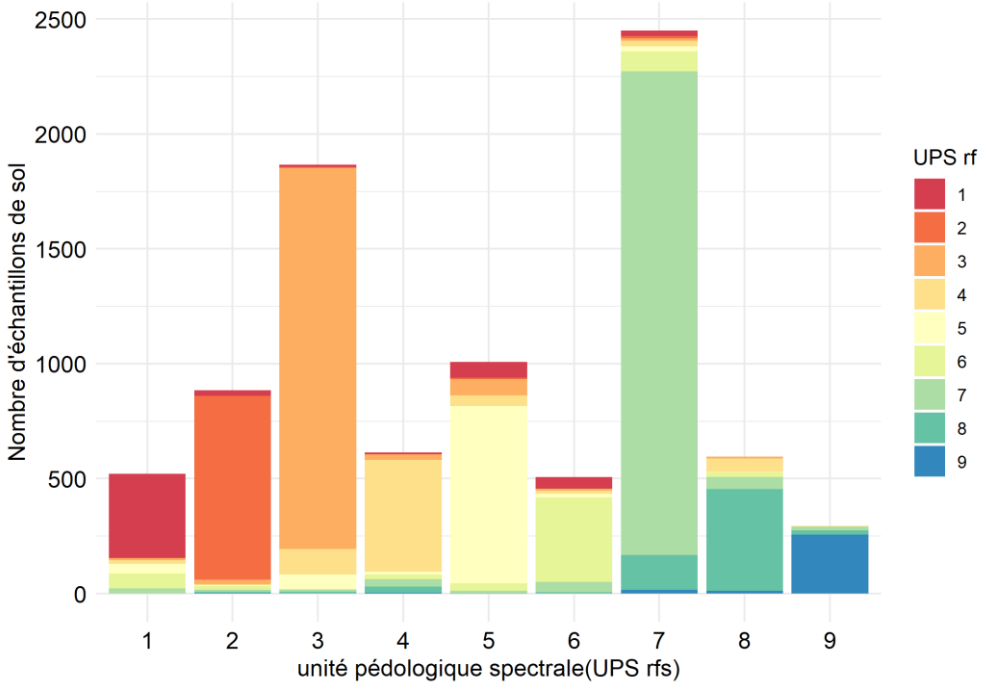


FIGURE 4.28 : REPARTITION DES ECHANTILLONS CLASSES SELON LA METHODE UPS RF PAR UNITE PEDOLOGIQUE SPECTRALE UPS RFS

De plus, l'analyse graphique des teneurs en carbone selon les méthodes de cartographie des unités pédologiques spectrales (Figure 4.29) montre des différences : la simplification du RF (Figure 4.29c) semble augmenter le nombre de points ayant des teneurs en carbone extrêmes mais conserve la différenciation des unités pédologiques spectrales selon leur teneur en COS de la classification spectrale par RF (Figure 4.29b). A l'inverse, la cartographie à partir des 962 points de la classification spectrale (Figure 4.29a) présentent beaucoup de valeurs extrêmes ce qui semble altérer la différenciation des unités pédologiques spectrales selon leurs teneurs en carbone.

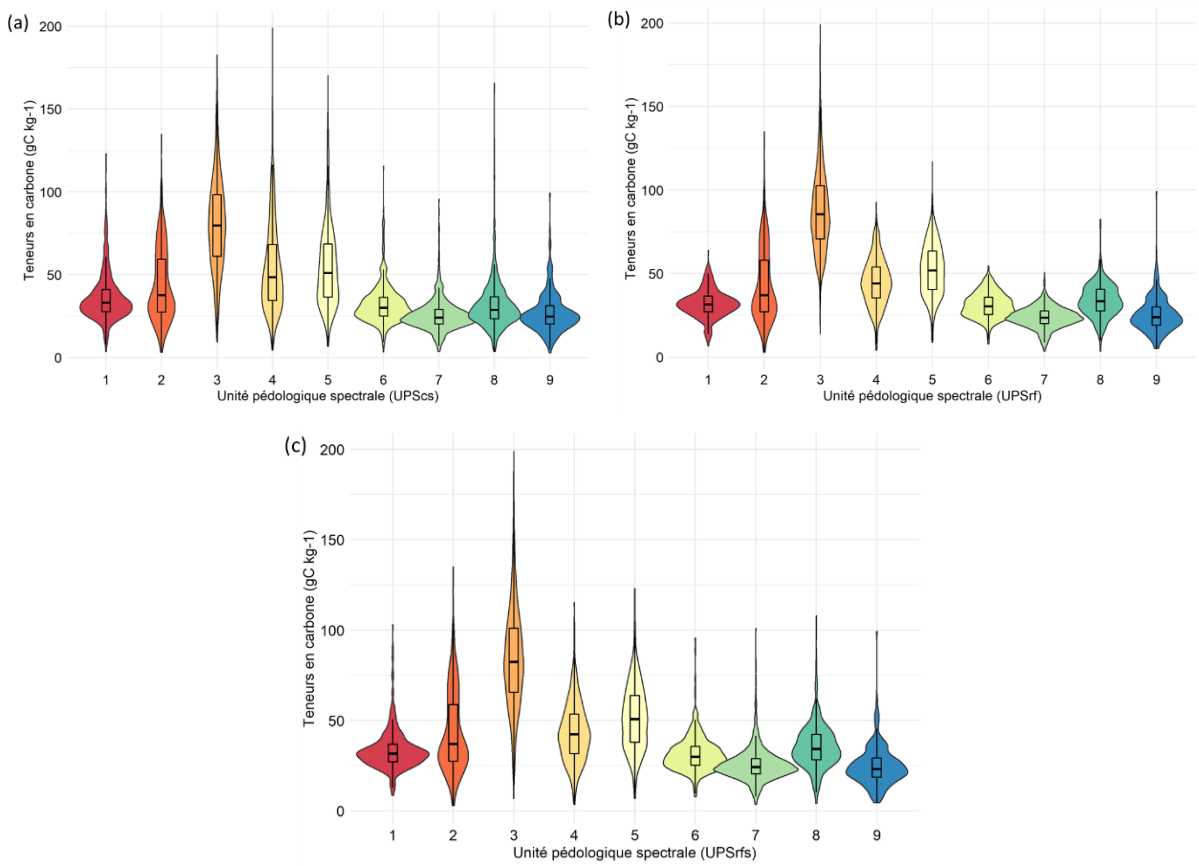


FIGURE 4.29 : TENEURS EN CARBONE (GC KG^{-1}) PAR METHODE DE CARTOGRAPHIE DES UNITES PEDOLOGIQUES SPECTRALES A PARTIR DE LA CLASSIFICATION SPECTRALE « UPSCS « (A), DU RANDOM FOREST « UPSRF » (B) OU A PARTIR DU RANDOM FOREST SIMPLIFIE « UPSRFS » (C)

L'analyse des coefficients de variations des teneurs en carbone (Tableau 4.9) montre effectivement des coefficients de variations plus élevés pour la cartographie « UPScs » que pour la cartographie « UPSrf ». La cartographie « UPSrfs » couplant des coefficients de variations intermédiaires (Tableau 4.9)et des unités cartographiques simplifiées (Figure 4.27b) a donc été choisie comme cartographie des unités pédologiques spectrales.

TABLEAU 4.9 : COEFFICIENTS DE VARIATIONS DES TENEURS EN COS DES 3 METHODES DE CARTOGRAPHIE DES UNITES PEDOLOGIQUES SPECTRALES

	UPS cs		UPS rfs		UPS rf
UPS	CV (%)	Différence avec CV UPSrf (%)	CV (%)	Différence avec CV UPSrf (%)	CV (%)
1	40	14	33	7	26
2	50	0	50	1	50
3	35	7	33	5	28
4	50	19	38	6	32
5	45	15	35	6	30
6	36	12	30	6	24
7	37	10	35	8	27
8	46	17	34	5	30
9	45	3	44	3	41

La méthodologie décrite en détail dans cette première partie du chapitre (et présentée dans l'article de la seconde partie du chapitre) a donc permis de cartographier des unités pédologiques spectrales, sur laquelle est basée la stratification du territoire, nécessaire à l'évaluation des stocks de COS des sols agricoles et des impacts des changements d'usage des sols agricoles sur ces stocks de COS.

4.2 Territoire hétérogène et variabilité du carbone des sols : stratification et spatialisation pour évaluer les effets des changements d'usages sur les stocks de carbone organique des sols agricoles de l'île de La Réunion

Auteurs :

Myriam Allo[1,2], Pierre Todoroff[1], Kenji Fujisaki[3], Alain Albrecht[3]

[1] CIRAD, UPR AIDA, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France. AIDA, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France. pierre.todoroff@cirad.fr

[2] ADEME, Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésillé, BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

[3] UMR Eco&Sols, IRD, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France. alain.albrecht@ird.fr

Auteur correspondant : Myriam Allo (myriam.allo@cirad.fr)

CIRAD, UPR AIDA, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France. AIDA, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

ADEME, Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésillé, BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

Résumé :

Le sens et l'ampleur des effets des changements d'usages sur les stocks de carbone des sols tropicaux sont méconnus, notamment parce que les facteurs biophysiques affectant le stockage du carbone organique du sol ne sont pas pris en compte dans les méthodes d'estimation actuelles, empêchant ainsi l'extrapolation à des régions présentant des conditions biophysiques différentes. La diversité pédologique et climatique de La Réunion recoupant une grande part de celle des régions tropicales, ce territoire semblait être un bon laboratoire d'étude pour éprouver des méthodes d'estimation des variations de stock de carbone du sol sous l'effet de changement d'usages dans des conditions pédoclimatiques contrastées. L'objectif de cette étude est de montrer que la prise en compte de l'hétérogénéité des déterminants des stocks de carbone du sol pour estimer les effets des changements d'usages du sol sur les stocks de carbone est possible en faisant appel aux récentes méthodes d'extraction de connaissances à partir de bases de données existantes, dites de fouille de données, couplées à des outils analytiques modernes (en l'occurrence la spectroscopie en moyen infrarouge), et intégrées dans une approche spatiale permettant de stratifier le territoire en zones homogènes du point de vue des déterminants du stockage du carbone organique du sol. Une méthodologie de stratification du territoire à partir des déterminants du carbone organique du sol (type de sol et climat) a permis de définir des unités spatiales homogènes vis-à-vis du carbone organique du sol, appelées unités pédoclimatiques. La spectroscopie moyen infrarouge, couplée à une classification non supervisée, a ainsi montré sa pertinence pour définir des unités pédologiques

contenant des informations minéralogique et organique distinctes le long d'un gradient d'altération liée à la pédogenèse en zone volcanique tropicale de La Réunion ainsi que pour calculer des stocks de COS à l'échelle territoriale. L'analyse des stocks de COS des sols agricoles de La Réunion a montré des stocks de COS très élevés mais qui restent vulnérables. En effet, les variations des stocks de COS entre usages agricoles ont été évaluées en synchronie par unité pédoclimatique et montrent des différences importantes entre le stock de COS sous canne à sucre et celui sous maraichage ou sous ananas. Ces variations importantes de stocks de COS (-19 MgC ha^{-1} en moyenne toutes unités pédoclimatiques et usages confondus) indiquent que les sols agricoles de La Réunion sont vulnérables aux changements d'usages agricoles. Cette sensibilité au déstockage de carbone semble être plus importante dans les sols andiques de La Réunion qui contiennent plus des trois quarts des quantités de carbone contenues dans les sols agricoles réunionnais. La protection des sols agricoles est donc un enjeu majeur dans le cadre d'une politique territoriale d'atténuation du changement climatique.

Mots-clés : Spectroscopie moyen infrarouge ; stratification ; stock de carbone organique du sol ; territoire hétérogène ; changements d'usages.

4.2.1 Introduction

Le récent rapport de l'IPCC estime que le bilan net des émissions de CO_2 dues aux changements d'usages des terres (principalement déforestation ou afforestation) est de 5.2 ± 2.6 $GtCO_2eq\ an^{-1}$, soit près de 10 % des émissions annuelles totales de GES, évaluées sur la période 2007 -2016 (IPCC, 2019). Or, la quasi-totalité des émissions de CO_2 est due aux changements d'usages des terres sous les tropiques (Houghton, 2013), dont les sols stockent par ailleurs 31 % du carbone du sol total, et les zones subtropicales 15% (FAO and ITPS, 2018). Il est donc essentiel d'évaluer les effets des changements d'usages sur les stocks de carbone organique des sols tropicaux pour estimer les émissions totales de GES et quantifier les stocks mondiaux de carbone du sol.

Le sens et l'ampleur des effets des changements d'usages sur les stocks de carbone des sols tropicaux restent néanmoins mal connus, notamment parce que les facteurs biophysiques affectant le stockage du carbone organique du sol ne sont pas pris en compte dans les méthodes d'estimation actuelles, empêchant ainsi l'extrapolation à des régions présentant des conditions biophysiques différentes. Ainsi, dans leur méta-analyse des études des variations de stocks de carbone du sol dus à des changements d'usage du sols sous les tropiques, (Powers et al., 2011) recommandent une extrême prudence quant à la généralisation des variations moyennes de ces stocks. Selon eux les déterminants biophysiques tels que la pluie moyenne annuelle et la composition minéralogique des argiles impactent fortement les effets des changements d'usage du sol sur le stock de carbone. Il est donc indispensable d'évaluer les variations de stocks de carbone dues aux changements d'usages du sol sur des zones où les déterminants biophysiques des stocks de carbone organique du sol sont peu variables (Powers et al., 2011).

L'objectif de cette étude est de montrer que la prise en compte de l'hétérogénéité des déterminants des stocks de carbone du sol pour estimer l'impact des changements d'usages du sol sur les stocks de carbone est possible en faisant appel aux récentes méthodes d'extraction de connaissances à partir de bases de données existantes, dites de fouille de données, couplées à des outils analytiques modernes (en l'occurrence la spectroscopie en moyen infrarouge), et intégrées dans une approche spatiale permettant de stratifier le territoire en zones homogènes du point de vue des déterminants du stockage du carbone organique du sol.

Ce travail a été réalisé sur l'île volcanique de La Réunion comme cas d'étude, un petit territoire de l'outremer français, dont la diversité pédologique et climatique recoupe une grande part de celle des régions tropicales, avec une très grande variété de sols (Ferralsols, Cambisols, Andosols) et différentes régions climatiques IPCC (Tropical Wet, Tropical Moist, Tropical Dry et Warm Temperate Moist). La Réunion, de par son relief accidenté, présente un remarquable gradient d'altération des roches et des cendres volcaniques de haut en bas de la topo-séquence, doublé d'un fort gradient climatique à la fois le long de la topo-séquence mais également entre la côte au vent très humide et la côte sous le vent sèche à semi-aride. En raison de ces gradients d'altération et climatique, la composition minéralogique des sols est très variable. La séquence minéralogique générale du haut vers le bas des topo-séquences passe ainsi de composés amorphes (allophanes/imogolites) dans les Andosols, à l'halloysite en milieu de séquence et à la metahalloysite dans les bas de versants, tandis que la gibbsite est présente de l'amont à l'aval. Le fer se trouve à l'état amorphe à l'amont et cristallisé en goethite vers le bas (Zebrowski, 1975). Dans ces sols volcaniques tropicaux, l'hétérogénéité se retrouve également dans leur chimie, en particulier le carbone organique du sol. Sur une topo-séquence du versant Ouest de l'île, les teneurs en carbone organique de l'horizon de surface (0-15cm) variaient ainsi de 20 gC kg^{-1} dans les Cambisols du bas de versant jusqu'à 139 gC kg^{-1} dans les Andosols silandiques en haut de la séquence, (Feder and Bourgeon, 2009).

La Réunion est donc un territoire spatialement hétérogène, à la fois d'un point de vue pédologique mais également d'un point de vue physico-chimique, qui en font un bon laboratoire d'étude pour éprouver des méthodes d'estimation des variations de stock de carbone du sol sous l'effet de changement d'usages dans des conditions pédoclimatiques contrastées. Les changements d'usages considérés dans cette étude ne concernent pas la forêt, que ce soit en termes de déforestation ou d'afforestation mais sont des alternatives au système canne à sucre. En effet, La Réunion est un territoire fortement anthropisé avec une forêt à l'état résiduel dans les bas de versant, où l'on retrouve la majorité des surfaces cultivées dont celles en canne à sucre, qui représentent plus de 50 % de la surface agricole en 2019.

Dans la première partie de cet article nous présentons les données disponibles, les méthodes d'analyse mises en œuvre et l'approche spatiale que nous avons adoptée. Celle-ci est constituée de 3 étapes : (1) la stratification du territoire selon les déterminants biophysiques (minéralogie et climat) du carbone organique du sol, réalisée en particulier à partir de la signature spectrale en moyen infra-rouge des échantillons de sol, (2) la spatialisation et la quantification des stocks de carbone organique du sol (COS), et (3) l'évaluation des effets des changements d'usage des sols sur les stocks de carbone organique du sol. Nous présentons les résultats obtenus dans la seconde partie et les discutons dans la troisième partie.

4.2.2 Matériel & Méthode

4.2.2.1 Données

4.2.2.1.1 Site d'étude et analyses de sol

La Réunion, département d'outre-mer, est une île volcanique tropicale à environ 21° de latitude sud et 55° de longitude est, située à 700km à l'Est de Madagascar dans l'Océan Indien (Figure 4.30). D'une superficie de 2 500km², l'île est la partie émergée d'un édifice de 7 000m de hauteur et se compose de deux volcans, le Piton des Neiges, stratovolcan culminant à 3 069m d'altitude et le Piton de La Fournaise (2 632m), parmi les volcans effusifs les plus actifs au monde.

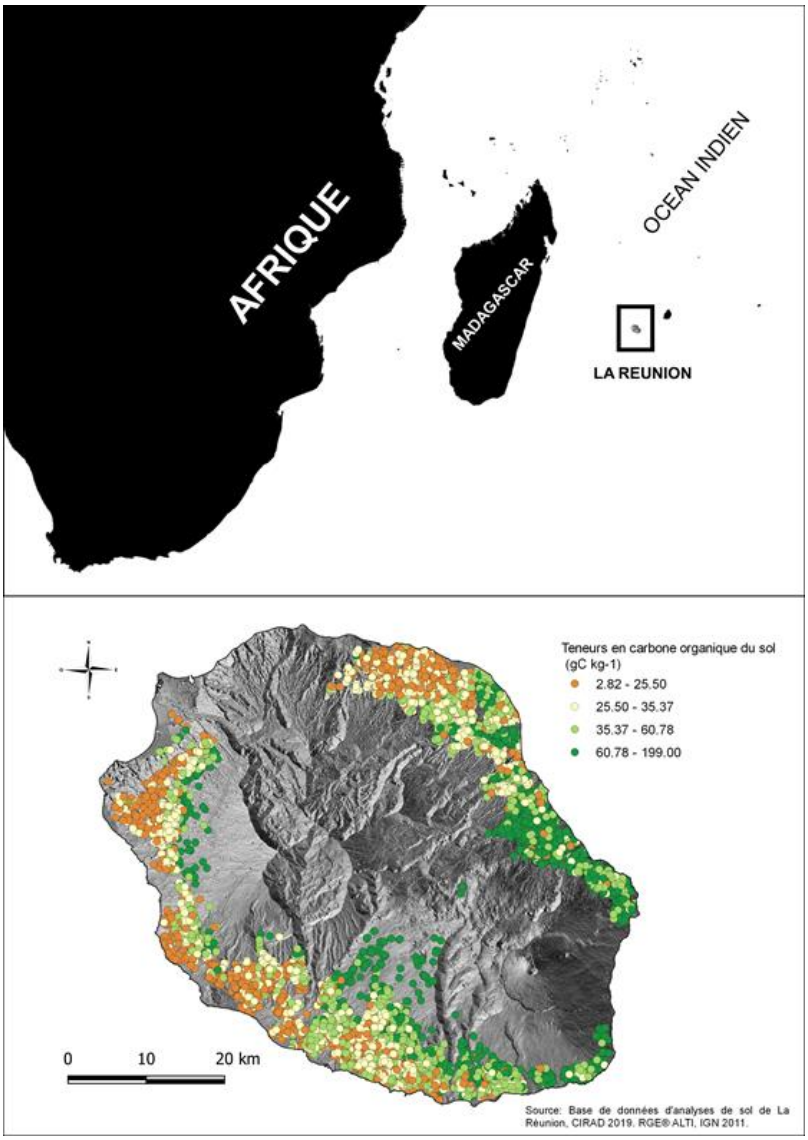


FIGURE 4.30 : LOCALISATION DE LA REUNION ET CARTOGRAPHIE DES TENEURS EN CARBONE DU SOL DES 8 742 ECHANTILLONS DE LA BASE DE DONNEES

Le laboratoire d'analyse des sols de La Réunion a constitué une base de données de 46 000 analyses d'échantillons de sols géoréférencés, prélevés entre 1993 et 2017 dans différents systèmes de culture : canne à sucre, prairie, maraichage, arboriculture, etc. Ces différents systèmes de culture ont été regroupés en 5 types d'usages au sein desquels les pratiques ont été estimées similaires du point de vue de leur impact sur le stockage du carbone : canne à sucre, prairie, maraichage de cycle long (ananas), maraichage de cycle court (légumes), et arboriculture. La majorité (80%) des échantillons de sols analysés proviennent de parcelles cultivées en canne à sucre. Après un nettoyage de la base de données (élimination des échantillons de sols correspondant à des expérimentations agronomiques, élimination des échantillons dont les coordonnées sont aberrantes ou ne correspondent pas à la bonne parcelle, échantillons de prélèvements profonds (>30 cm), etc…), 8742 analyses d'échantillons de sol géo-référencés de profondeur 0-30 cm et provenant de parcelles agricoles de différents usages réparties sur l'ensemble des surfaces cultivées de La Réunion ont été sélectionnées (Figure 4.30, Tableau 4.10).

TABLEAU 4.10 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES ANALYSES DE SOL DE LA BASE DE DONNEES

	C	N	pH	pH_{KCl}	P_{Olsen}	CEC	Ca	Mg	K	Na
	gC kg^{-1}	gN kg^{-1}			mg kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}	cmol kg^{-1}
Min.	2,82	0,00	3,70	3,50	1,00	0,24	0,00	0,01	0,01	0,00
Q1	25,50	2,23	5,00	4,30	75,37	5,47	1,48	0,92	0,18	0,07
Médiane	35,37	2,99	5,40	4,61	149,79	8,46	3,47	2,08	0,39	0,13
Moyenne	45,85	3,79	5,52	4,76	243,96	10,17	4,83	2,93	0,62	0,19
Q3	60,78	4,89	5,98	5,09	301,10	13,44	7,10	4,04	0,84	0,22
Max.	199,00	19,70	9,06	8,26	6131,06	49,40	31,70	29,20	28,60	7,02
Ecart-type	28,26	2,20	0,76	0,62	308,84	6,49	4,34	2,86	0,78	0,25

4.2.2.1.2 Des données spatialisées

Etablie en 1991, la carte morpho-pédologique de La Réunion à l'échelle du 1/50 000 identifie 93 unités de milieu pédologique, décrites de manière détaillée dans sa notice (Raunet, 1991). Ces types de sol ont été regroupés en 8 classes de sol principales (sols andiques, sols andiques perhydratés, sols bruns, sols bruns andiques, sols ferrallitiques, sols ferrallitiques andiques, sols vertiques et sols sur alluvions) (Figure 4.31) (Pouzet, 2002).

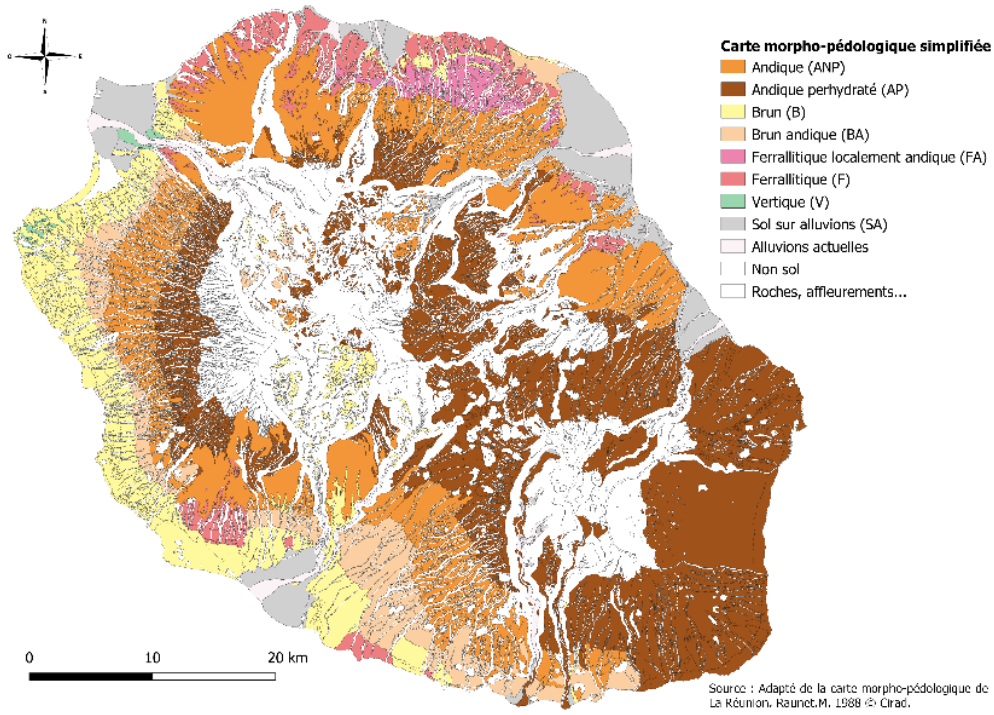


FIGURE 4.31 : CARTE MORPHO-PEDOLOGIQUE SIMPLIFIEE DE LA REUNION

Une cartographie des régions climatiques définies par l'IPCC (IPCC, 2006) a été réalisée sur le territoire de La Réunion (Figure 4.32) à partir des paramètres climatiques (pluies moyennes annuelles (PMA), températures moyennes annuelles (TMA), évapotranspiration (ETP) issus du réseau de stations météorologiques CIRAD-MétéoFrance. Trois climats tropicaux (TMA >18) ont été identifiés : 'Tropical Wet' (PMA > 2m), 'Tropical Moist' (1m < PMA < 2m), 'Tropical Dry' (PMA < 1m), ainsi qu'un climat tempéré 'Warm Temperate Moist' (10°C < TAM < 18°C et PMA > ETP).



FIGURE 4.32 : CARTE DES UNITES CLIMATIQUES DE L'IPCC DE LA REUNION

Une carte d'occupation du sol 2017 produite par le CIRAD à partir d'images satellites à très haute résolution spatiale Spot6/7 a permis d'identifier les surfaces agricoles selon les grands types d'usage définis pour les besoins de cette étude (Figure 4.33) et qui se répartissent comme suit : canne à sucre (51% de la surface agricole), l'arboriculture (22%), la prairie (16%), le maraichage (7%) et l'ananas (1%) (Dupuy, 2018).

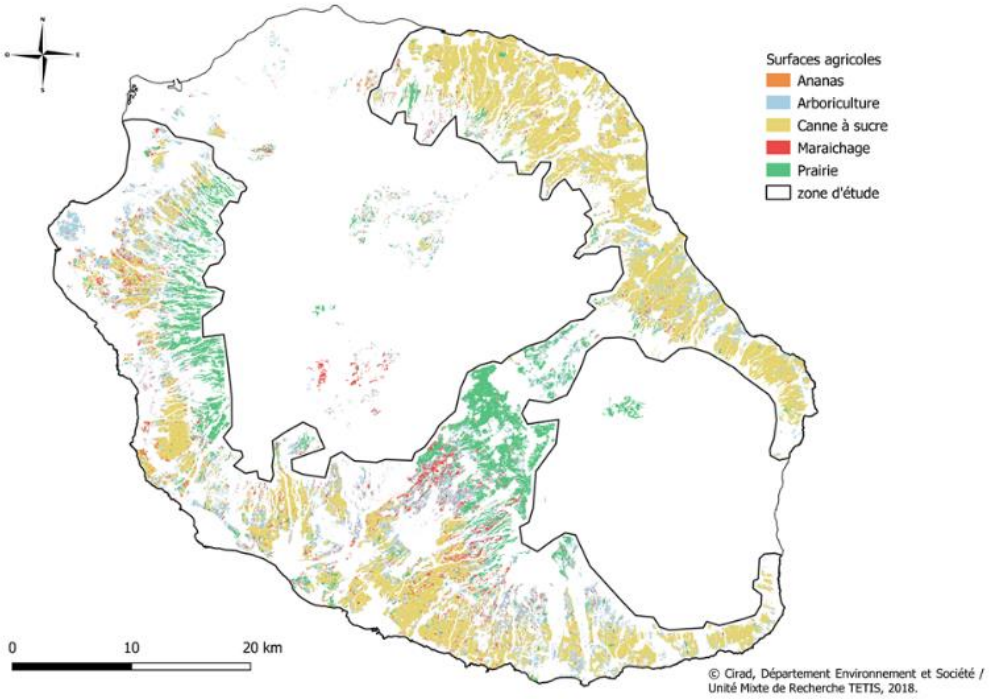


FIGURE 4.33 : CARTE D'OCCUPATION DES SOLS AGRICOLES DE LA REUNION

Des données spatialisées supplémentaires ont été utilisées en tant que co-variables telles que des données géologiques (BRGM, 2006), des données issues d'un modèle numérique de terrain (altitude et pente) (Litto3D®, IGN-SHOM, 2008) et des données climatiques (nombre de mois peu pluvieux) (Raunet, 1991).

Parmi les échantillons sélectionnés, 962 échantillons de sols, correspondant principalement à des parcelles de canne à sucre, et répartis sur l'ensemble des surfaces cultivées, ont été extraits de la pédothèque du laboratoire d'analyses de sol et broyés à 200 µm. Un spectre moyen-infra-rouge (MIR) a ensuite été acquis avec un spectromètre FTIR portatif Agilent 4300 (Agilent technologies, Santa Clara, CA) en plaçant la tête de l'appareil (DRIFT), directement sur l'échantillon de sol séché et broyé à 200 µm. Chaque spectre est la moyenne de 120 spectres internes acquis en absorbance sur une gamme de nombre d'ondes entre 700 et 4 000 cm^{-1}, avec un intervalle de mesure de 4 cm^{-1}. Un spectre de référence (référence « Argent ») est effectué toutes les 30 minutes.

4.2.2.2 Analyses des données spectrales

4.2.2.2.1 Prétraitements et modèles de prédiction par spectroscopie IR

Les 962 spectres moyen infra-rouge (MIR) ont subi des prétraitements selon deux méthodes : (i) un lissage (13 points), une SNV (Standard Normal Variate) et ligne de base afin de prédire la densité apparente et les produits amorphes à partir de modèles développés sur 95 spectres MIR ayant subis le même prétraitement (Allo et al., 2020) et d'analyser qualitativement les bandes d'absorptions liées aux minéraux du sol ; et (ii) un lissage (13 points), une ligne de base, et une dérivée seconde (Gap-segment 5:5 points) afin de mettre en évidence les pics d'absorption liés à la phase minéralogique et organique et de les utiliser comme données d'entrée d'une classification en groupes d'échantillons de sols homogènes.

Parallèlement, les quantités de fer, d'aluminium et de silicium extraites par dissolutions sélectives à l'oxalate d'ammonium (Al_o, Fe_o, Si_o), au pyrophosphate de sodium (Al_p, Fe_p) et au CBD (citrate-bicarbonate-dithionite) (Al_c, Fe_c) ont été dosées par ICP-AES. Les quantifications de ces produits amorphes (Al_o, Fe_o, Si_o, Al_p, Fe_p, Al_c, Fe_c) sur 95 échantillons de sols de La Réunion ont servi de mesures de références pour construire des modèles de prédiction à partir des 95 spectres MIR de ces échantillons de sols. La densité apparente (D_{app}) de ces échantillons a été mesurée sur le terrain par la méthode conventionnelle des cylindres.

L'objectif est de prédire ces variables sur les 962 spectres MIR du jeu de données afin de 1) calculer des stocks de COS pour chaque échantillon et 2) analyser la minéralogie des groupes d'échantillons de sol issus de la classification spectrale non supervisée. Les modèles de calibration de la densité apparente (D_{app}) et des produits amorphes (Al_o, Fe_o, Si_o, Al_p, Fe_p, Al_c, Fe_c) ont été construits à partir de 95 spectres MIR (Allo et al., 2020) en utilisant une partial least squares regression (PLSR), la méthode leave-one-out a été utilisée comme validation croisée (Tableau 4.11). Les valeurs prédites négatives des teneurs en produits amorphes ont été modifiées en valeurs nulles.

Les paramètres utilisés pour évaluer la performance des modèles PLSR sont le coefficient de détermination (R^2_{cv}), l'erreur standard de la validation croisée (SECV) et deux indicateurs que sont le RPD (ratio de l'écart-type de la population sur l'erreur standard de la validation croisée) (Chang et al., 2001) et le RPIQ (ratio de la distance interquartile sur l'erreur standard de la validation croisée) (Bellon-Maurel et al., 2010). La densité apparente et les produits amorphes ont ensuite été prédits sur les 962 spectres MIR à partir de ces modèles. L'analyse chimiométrique des données spectrales a été réalisée avec le logiciel The Unscrambler X 10.5 Software (CAMO Software Inc., Oslo, Norway).

TABLEAU 4.11 : MODELES DE CALIBRATION ET DE VALIDATION CROISEE DE LA DENSITE APPARENTE ET DES PRODUITS AMORPHES PAR PLSR A PARTIR DE 95 SPECTRES MIR

Variable	*Statistiques descriptives*					*Calibration*			*Validation croisée*								
	N	*Mean*	*SD*	*Q1*	*Q3*	R^2	*RMSE*	*slope*	R^2_{cv}	$RMSE_{cv}$	*slope*	SECV	bias	SEPc	PCs	RPD	RPIQ
Dapp	91	1,0	0,3	0,8	1,2	0,85	0,09	0,85	0,83	0,10	0,84	0,10	0,00	0,10	3	2,41	3,85
Alo	95	20,2	20,2	4,4	33,9	0,90	6,29	0,90	0,88	6,88	0,90	6,92	-0,14	6,91	3	2,92	4,27
Feo	94	15,4	9,3	7,0	25,0	0,85	3,61	0,85	0,71	5,07	0,77	5,09	0,10	5,04	9	1,83	3,53
Sio	94	6,3	7,8	0,6	9,9	0,95	1,74	0,95	0,91	2,39	0,92	2,40	-0,01	2,40	9	3,26	3,88
Alp	92	5,9	4,6	2,3	7,9	0,89	1,52	0,89	0,84	1,86	0,86	1,77	0,03	1,76	6	2,59	3,18
Fep	91	6,7	5,9	1,7	10,6	0,80	2,51	0,80	0,70	3,08	0,75	3,09	0,11	3,08	6	1,90	2,87
Alc	94	21,7	8,1	15,8	26,8	0,77	3,85	0,77	0,72	4,30	0,74	4,32	-0,02	4,32	5	1,87	2,53
Fec	94	75,6	19,6	65,7	86,3	0,89	6,49	0,89	0,76	9,63	0,82	9,68	-0,09	9,59	11	2,02	2,13

4.2.2.2.2 Classification des sols à partir des données spectrales

Plusieurs études ont montré l'intérêt de la spectroscopie proche (Demattê and da Silva Terra, 2014; Terra et al., 2018) et moyen infra-rouge (Heil et al., 2019) combinées à des méthodes statistiques de classification pour caractériser et classifier les sols. Demattê and da Silva Terra, (2014) ont montré l'intérêt de la spectroscopie proche infrarouge pour différencier les sols selon le niveau d'altération des matériaux parentaux. La spectroscopie moyen infra-rouge permet de détecter les minéraux présents dans l'échantillon de sol, à travers l'interprétation des signatures spectrales. En effet, des pics d'absorbance correspondant aux vibrations fondamentales de liaisons interatomiques, contrairement aux bandes du proche infra-rouge qui correspondent à des harmoniques de ces vibrations, peuvent être associées plus précisément à certains types de minéraux.

Plusieurs méthodes de classification (classification ascendante hiérarchique), de partitionnement (k-means, k-medoids, fuzzy k-means, fuzzy k-medoids, réseau de neurones de type Self-Organising Maps) ont été appliquées sur les spectres MIR prétraités des 962 échantillons de sol ou sur leurs cinq premières composantes principales issues de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2019) afin d'identifier la méthode la plus adaptée pour distinguer des groupes d'échantillons de sols de La Réunion. Pour chaque méthode de classification, nous avons fait varier le nombre de classes de 2 à 20. Cependant, aucune valeur optimale n'apparaissait quelle que soit la méthode de classification utilisée. Ce résultat semble être dû aux données spectrales elles-mêmes dont l'information minéralogique et organique qu'elles contiennent suivent un gradient lié à la pédogenèse des sols réunionnais, rendant difficile la séparation des spectres en groupes distincts.

La méthode de classification non supervisée par partitionnement k-medoids sur les spectres MIR prétraités a finalement été appliquée avec le package 'cluster' du logiciel R (Maechler et al., 2019). Simple et robuste, cet algorithme permet de former des groupes homogènes (les échantillons sont aussi semblables que possible au sein d'un groupe) et différenciés (les groupes sont aussi dissemblables entre eux que possible) dont les centres de groupes sont des échantillons appartenant au jeu de données.

Compte tenu de la nature des sols volcaniques tropicaux de La Réunion, les 962 échantillons de sol ont été divisés en 2 groupes de sols, correspondant à des échantillons de sols à caractère andique et les échantillons de sols à caractère non andique. Ces deux groupes ont ensuite été subdivisés : les échantillons de sols à caractère andique en 5 groupes et les échantillons de sols à caractère non andique en 4 groupes. Les échantillons de sols ont donc été répartis en 9 groupes de sol, homogènes d'un point de vue spectral. Le nombre de groupes de sol a donc été choisi par expertise, sur plusieurs critères pédologiques.

Une ACP des spectres prétraités a été réalisée sous R à l'aide du package 'FactoMineR' (Le et al., 2008) afin d'analyser la répartition des différents groupes d'échantillons de sol sur les composantes principales. L'analyse des spectres moyens, calculés par groupe d'échantillons de sol avec le logiciel R, a par ailleurs permis d'analyser les pics d'absorption et d'identifier qualitativement les minéraux caractéristiques de chaque groupe. Les statistiques descriptives des groupes de sol ont également permis de caractériser leurs propriétés chimiques et minéralogiques (produits amorphes).

4.2.2.3 Outils de fouille de données et de spatialisation

Afin de délimiter plus finement les contours géographiques des groupes d'échantillons de sol issus de la classification k-medoids des 962 échantillons de sol, nous avons augmenté la densité de points en recrutant les autres échantillons de la base de données d'analyses de sol. Nous avons prédit un groupe de sol pour chacun de ces échantillons via une classification supervisée par apprentissage automatique utilisant l'algorithme Random Forest (Liaw and Wiener, 2002) à l'aide du logiciel R. La base d'apprentissage a été constituée par les 962 échantillons classés par l'algorithme k-medoids. Les prédicteurs ont été sélectionnés par expertise en fonction de leur rôle dans la pédogenèse : 2 variables qualitatives (âge et type des matériaux parentaux géologiques et nombre de mois peu pluvieux) et 10 variables quantitatives (C, N, pH, pHKCl, CEC, et somme des bases, altitude et pente, pluie médiane annuelle et température moyenne annuelle). Un test de corrélation des variables quantitatives a été réalisé afin de supprimer les variables fortement corrélées (r >0.8) (N, pH, Somme des bases, température annuelle moyenne) pour ne pas biaiser l'algorithme de Random Forest, très sensible aux variables prédictives corrélées. La prédiction des groupes de sol a été réalisée sur les 7780 échantillons de sol restants de la base de données.

Nous avons eu recours à des polygones de Voronoï pour transformer l'information ponctuelle de groupe d'échantillons de sol sous forme de polygones et ainsi délimiter les contours géographiques d'unités pédologiques. La géolocalisation des échantillons permet de définir des cellules de Voronoï qui partitionnent le territoire en autant de polygones qu'il y a d'échantillons de sol. Chaque polygone est défini tel que chaque point à l'intérieur du polygone est plus proche de l'échantillon se situant à l'intérieur du polygone que des autres échantillons. Cette méthode a été appliquée aux 8742 échantillons de sol géoréférencés de la base d'analyses de sol avec le logiciel open source QGIS 3.8 (QGIS Development Team, 2019).

4.2.2.4 Calculs des stocks et Δstocks de carbone organique du sol

Pour chaque analyse de sol sur 0-30 cm de profondeur, les stocks de carbone organique du sol sont calculés selon l'équation suivante :

$$SOC\ stock\ (MgC\ ha^{-1}) = SOC\ teneur\ (g\ 100g^{-1}) * densité\ apparente\ (g\ cm^{-3}) * épaisseur\ (30\ cm)$$

Où la teneur en carbone du sol est issue d'une analyse de sol en laboratoire, et la densité apparente résulte de la moyenne par groupe d'échantillons de sol des densités apparentes prédites par spectroscopie MIR sur les 962 échantillons de sol. Les éléments grossiers n'ont pas été pris en compte. Afin d'atténuer la variabilité de la teneur en carbone du sol, inhérente à la variabilité locale des propriétés des sols (même dans une même unité pédoclimatique), nous avons choisi de calculer les différences de stocks entre usages en sélectionnant par requête spatiale des couples d'échantillons (canne et autre usage) géographiquement proches l'un de l'autre (« les voisins »). L'objectif est d'identifier le plus finement possible l'effet 'mode d'usage' pour une unité pédoclimatique donnée sur les stocks de carbone organique du sol. La méthode proposée consiste à comparer au sein d'une unité

pédoclimatique donnée dans un rayon de 1 km (dénommé 'buffer') autour d'un échantillon d'usage autre que la canne à sucre (ananas, maraichage, prairie, arboriculture), le stock de COS de la canne à sucre (ou stock de COS moyen si plusieurs échantillons de sols sous canne à sucre sont présents à l'intérieur des buffers), avec le stock de COS d'un usage autre. La différence de stock de carbone du sol (Δstock = Stock COS autre usage - Stock COS canne à sucre) est calculée dans chaque buffer. La moyenne (± écart-type) des différences de stocks pour chaque unité pédoclimatique et chaque couple d'usage, associée à un test de Student permet de tester si cette différence est significative. Les tests statistiques ont été réalisés avec le logiciel R (R Core Team, 2019).

4.2.3 Résultats

4.2.3.1 La stratification du territoire, une méthodologie nécessaire pour l'évaluation des stocks de COS

4.2.3.1.1 Signature spectrale et minéralogie

La classification non supervisée par partitionnement k-medoids, à partir des 962 spectres MIR de sols, a permis de classer les échantillons en 9 groupes de sol, homogènes d'un point de vue spectral.

L'interprétation des spectres moyens des groupes a permis de mettre en évidence les principaux minéraux présents (Figure 4.34a). Les bandes d'absorption à 3695 et 3620 cm^{-1} correspondant aux vibrations d'élongation Al_2OH, présentes ici à 3675 et 3626 cm^{-1}, et la bande d'absorption à 920 cm^{-1}, observée ici à 930 cm^{-1}, correspondant à une déformation angulaire de Al_2OH (Joussein et al., 2005), sont caractéristiques de l'halloysite (Joussein et al., 2005) et sont présentes dans les groupes d'échantillons de sol (6,7,8 et 9). L'absence d'un pic à 3675 cm^{-1} mais un simple épaulement pour les spectres moyens des groupes 6, 8 et 9 pourrait indiquer la présence d'halloysite hydratée (halloysite 10Å) en raison de vibrations d'élongation réduites des liaisons OH des hydroxyles libres ou des OH de surface par l'intercalation d'eau entre les feuillets (Hidalgo et al., 2010) comparativement à une halloysite déshydratée probablement présente dans le groupe 7. La gibbsite, quant à elle, reconnaissable à sa bande à 3620 cm^{-1} et ses trois bandes d'absorption caractéristiques (3527, 3464, 3391 cm^{-1}) (Parikh et al., 2014), est présente dans les groupes d'échantillons de sol 1, 5 et 6. Enfin, l'absence de pics d'absorption entre 3800 et 2800 couplée à une absorbance élevée à 1640 cm^{-1} et 1390 cm^{-1} (eau de constitution) traduisent la présence d'allophanes (2, 3 et 4) (Basile-Doelsch et al., 2005b).

Cette analyse qualitative des spectres moyens couplée à l'ACP des spectres MIR permet de démontrer que les groupes d'échantillons de sol s'articulent autour de 3 pôles minéralogiques (allophanes, gibbsite, halloysite) sur les deux premières composantes principales avec une différenciation assez nette des différents groupes d'échantillons de sol entre eux (Figure 4.34b). Les groupes 1, 5 et 6 forment le pôle gibbsite, les groupes 3, 4 et 2 forment le pôle allophanique et les groupes 7, 8 et 9 le pôle halloysite.

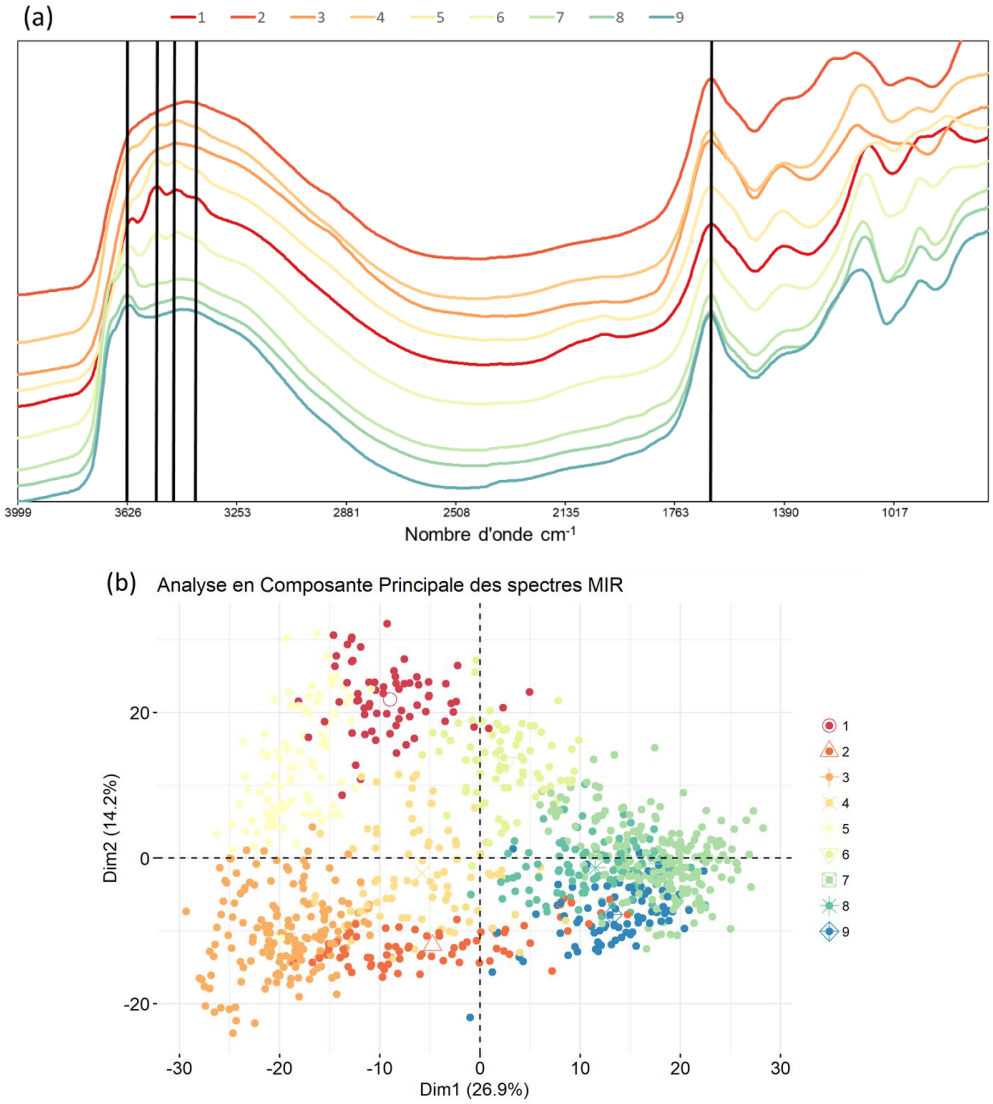


FIGURE 4.34 : SPECTRES MIR MOYENS (A) ET ACP DES SPECTRES MIR (B) PAR GROUPE D'ECHANTILLONS DE SOL OBTENUS PAR LA CLASSIFICATION SPECTRALE

Les teneurs en allophanes, minéraux amorphes (aluminosilicates) présents notamment dans les sols volcaniques tels que les Andosols, dont les teneurs ont été estimées à partir de la formule de Mizota and Reeuwijk, (1989) (allophanes (%) = 100Sio/[23.4-5.1(Al_o-Al_p) /Si_o]), permettent de discriminer les sols à allophanes (Figure 4.35a). De plus, les valeurs prédites des produits amorphes permettent de calculer l'indicateur « oxalfe » (Al_o + ½ Fe_o) qui définit le caractère andique des sols s'il est supérieur à 20 g kg^{-1} (IUSS Working group WRB, 2014) (Figure 4.35b). Les groupes de sol 3, 4, 5 sont des échantillons de sol à caractère andique avec un indicateur oxalfe > 20 g kg^{-1} couplé aux teneurs en allophanes les plus élevées du jeu de données. Le groupe 1 présente des teneurs en allophanes intermédiaires et l'indicateur oxalfe montre que la moitié des échantillons est en dessous du seuil à 20 g kg^{-1} et l'autre moitié au-dessus du seuil, ce qui est également le cas pour le groupe 2 qui présente cependant une variabilité plus forte des teneurs en allophanes. Les groupes 1 et 2 sont donc composées d'échantillons de sol à caractère andique plus ou moins développé. A l'inverse, les groupes de sol 6, 7, 8 et 9 ont des teneurs en allophanes très faible (< 2.5%) et des indicateurs oxalfe inférieurs à 20 g kg^{-1}, indiquant que ces échantillons de sol n'ont pas de caractère andique, comme l'indiquait l'analyse des spectres moyens et leur position sur l'ACP (Figure 4.34).

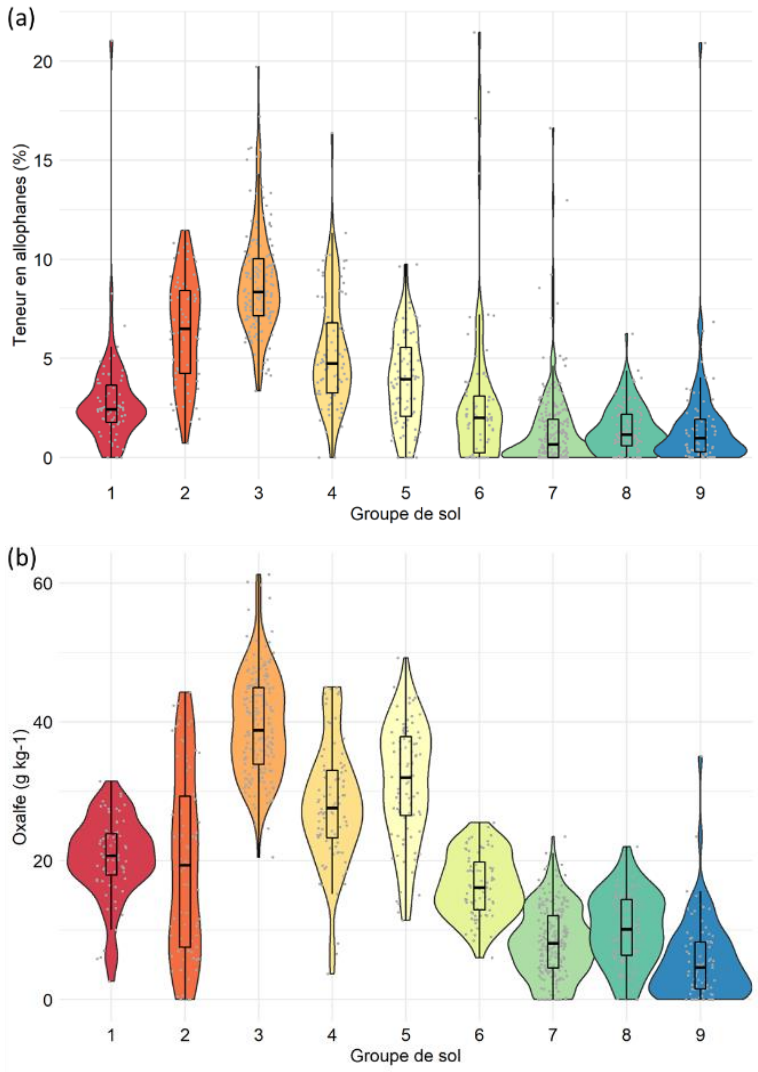


FIGURE 4.35 : BOXPLOT DES TENEURS EN ALLOPHANES (A) ET DE L'INDICATEUR « OXALFE » (B) PAR GROUPE D'ECHANTILLONS DE SOL OBTENUS PAR LA CLASSIFICATION SPECTRALE

4.2.3.1.2 Variables chimiques

L'analyse des propriétés chimiques des 962 échantillons de sol issues des analyses du laboratoire de La Réunion montre une différenciation entre les différents groupes d'échantillons de sol. Les teneurs en carbone sont homogènes par groupe de sol, bien que les groupes d'échantillons de sol à caractère andique présentent tout de même une variabilité plus importante que les autres groupes. Les teneurs en carbone (Figure 4.36a) sont plus élevées dans les groupes d'échantillons de sol allophaniques (3,4 et 5), notamment le groupe 3 avec des teneurs en carbone globalement supérieures à 50 gC kg^{-1}. Le groupe 2 présente une forte variabilité des teneurs en carbone, liée au caractère andique plus ou moins marqué, tel que l'indiquaient les valeurs de l'indicateur « Oxalfe ». A contrario, le groupe 1, dont le minéral principal est la gibbsite, présente des teneurs en carbone aussi faibles que les groupes non andiques avec des valeurs médianes autour de 25 gC kg^{-1}.

De plus, les échantillons de sol à gibbsite (1, 5 et 6) ont une capacité d'échange cationique (CEC) très faible (Figure 4.36b), caractéristique de la gibbsite, de formule $Al(OH)_3$ présentant très peu de charges électronégatives à sa surface et donc une faible capacité à adsorber des cations. Si les groupes d'échantillons de sol à caractère andique présentent des CEC très variables au sein de chaque groupe,

les groupes d'échantillons de sol non andiques se différencient en fonction de leur CEC, depuis le groupe 6 dont la gibbsite explique une CEC très faible jusqu'au groupe 9 présentant les CEC les plus élevées. La CEC plus élevée des sols du groupe 9 pourrait indiquer la présence d'argiles 2:1 ou 2:1:1 en mélange ou sous forme de couche interstratifiées avec l'halloysite, situation où la CEC peut atteindre théoriquement 60 cmol kg^{-1} (Legros, 2007; Norrish, 1995). Or, il est très difficile d'identifier des bandes d'absorption spécifiques dans le moyen infra-rouge de ce type de mélange (Delvaux et al., 1990) ce qui explique des spectres MIR moyens très similaires entre les groupes 7, 8 et 9. D'autre part, la CEC de l'halloysite augmentant avec le degré d'hydratation (Grim, 1968; Joussein et al., 2005; Norrish, 1995), la différence des CEC observées entre le groupe 7 et le groupe 8 est un nouvel argument pour une distinction entre halloysite déshydratée pour le groupe 7 et hydratée pour le groupe 8.

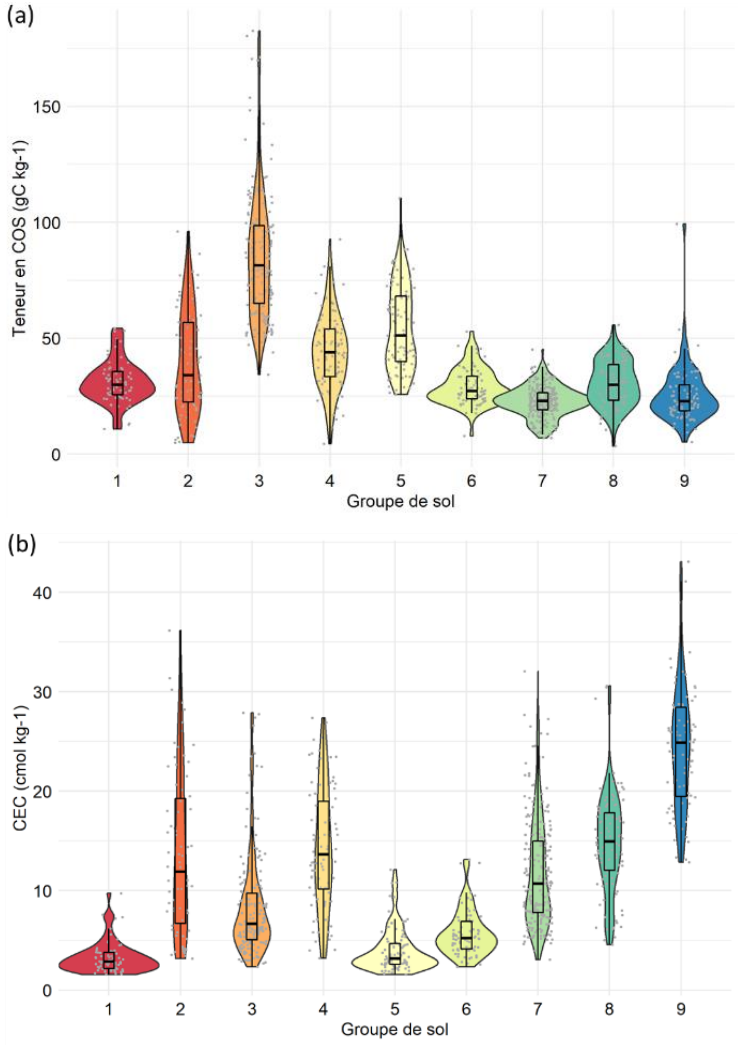


FIGURE 4.36 : BOXPLOT DES TENEURS EN CARBONE (GC KG^{-1}) (A) ET DE LA CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE (CEC) (CMOL KG^{-1}) (B) PAR GROUPE D'ECHANTILLONS DE SOL OBTENUS PAR LA CLASSIFICATION SPECTRALE

4.2.3.1.3 Structure spatiale et comparaison des classifications de sol

La nouvelle classification pédologique spectrale recoupe en partie la classification de la carte morpho-pédologique simplifiée (Pouzet, 2002) (Figure 4.37). Les gradients de pédogenèse se visualisent dans la structure spatiale, avec des groupes de sol andiques sur le massif récent du piton de La Fournaise et en altitude. Les sols à halloysite, plus évolués sont présents au Nord et à l'Ouest de l'île, sur les sols les plus anciens.

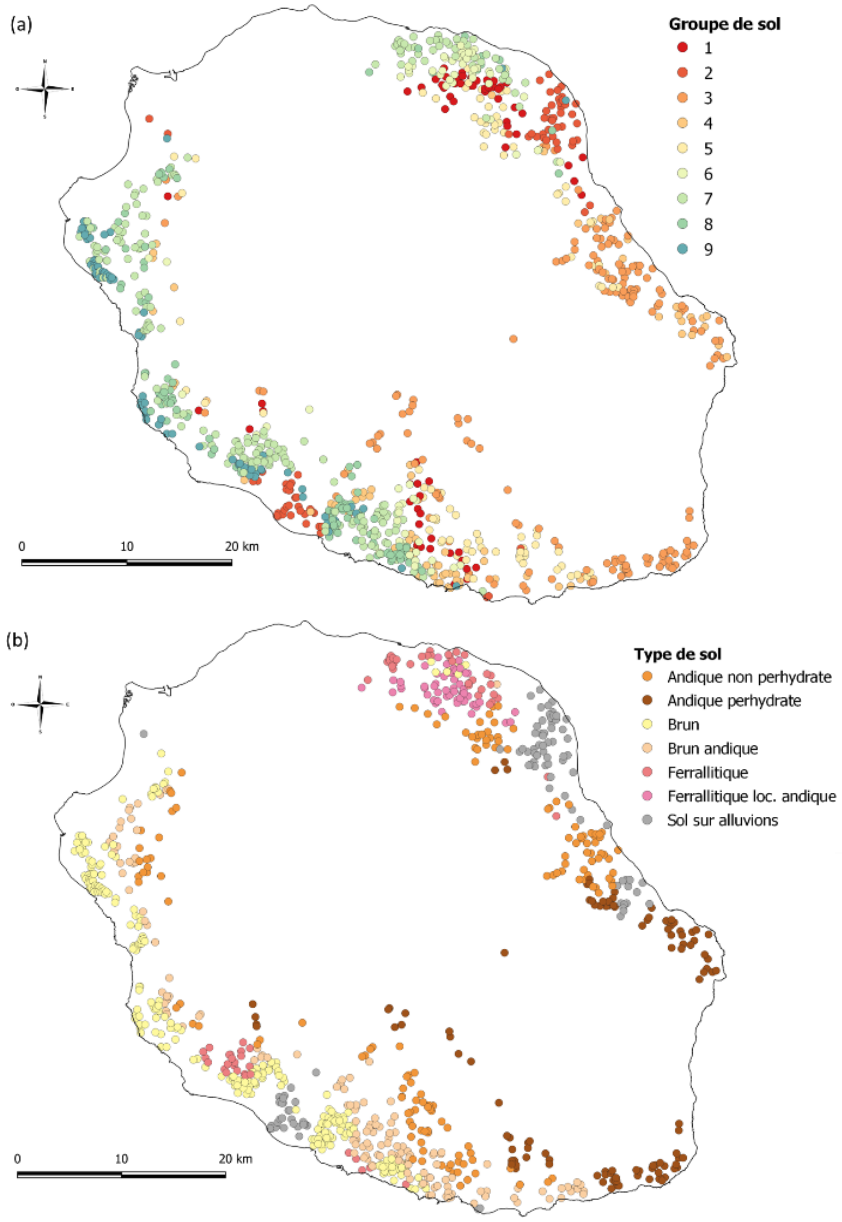


FIGURE 4.37 : CARTOGRAPHIE DE LA CLASSIFICATION SPECTRALE NON SUPERVISEE (A) ET DE LA CLASSIFICATION MORPHO-PEDOLOGIQUE SIMPLIFIEE (B)

Les structures spatiales des deux classifications sont relativement similaires, le tableau de contingence (Tableau 4.12) met en évidence les similitudes et les discordances. Les sols à allophanes (groupes 3 et 5) correspondent bien aux sols « Andique perhydraté » et « Andique non perhydraté » tandis que le groupe 4 est constitué des sols « Andique », « Brun », et « Brun andique ». Le groupe de sol 2, très bien détecté par la spectroscopie, est très majoritairement issu de la classe « Sol sur alluvions ». Le groupe de sol 1, marquée par la présence de gibbsite mais avec un caractère andique provient des deux groupes de sol « Andique non perhydraté » et « Ferrallitique localement andique ». Le groupe de sol 6, marquée par la présence d'halloysite et de gibbsite, est principalement issu des sols « Brun andique » et « Ferrallitique localement andique ». La répartition des sols à halloysite (7 et 8), quant à elle, recoupe globalement les sols « Brun », « Brun andique » et « Ferrallitiques » tandis que le groupe de sol 9, à halloysite et argiles interstratifiées recoupe majoritairement les sols « Bruns ».

TABLEAU 4.12 : TABLE DE CONTINGENCE ENTRE LES UNITES PEDOLOGIQUES SPECTRALES ET LA CARTE MORPHO-PEDOLOGIQUE SIMPLIFIEE

Effectifs	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Andique non perhydraté	22	1	48	12	49	8	6	4	0
Andique perhydraté	2	1	76	12	18	1	0	0	0
Brun	0	6	1	13	1	8	81	65	69
Brun andique	2	0	12	35	9	15	54	20	2
Ferrallitique	5	0	0	0	1	4	41	9	1
Ferrallitique loc. andique	20	0	0	0	5	21	7	2	0
Sol sur alluvions	3	66	17	2	0	3	1	2	2

Les sols à allophanes (1 à 5) correspondent donc majoritairement aux sols à caractère andique de la carte morpho-pédologique (Andiques perhydratés, Andiques non perhydratés, sols bruns et ferrallitiques andiques) ainsi qu'au cas particulier des sols sur alluvions. La répartition de ces échantillons entre les deux classifications est différente en raison des informations minéralogiques et organiques contenues dans les spectres MIR. Ils se différencient par leur teneur en allophanes, en gibbsite et en carbone organique. Les sols à halloysite (6 à 9) correspondent majoritairement aux sols bruns et ferrallitiques mais se différencient par la présence ou absence de gibbsite, d'halloysite et argiles interstratifiées dont les caractéristiques modifient leurs propriétés d'échange.

4.2.3.1.4 Nomenclature des unités pédologiques spectrales

L'analyse des signatures spectrales MIR et des variables chimiques permet de caractériser et donc de dénommer les groupes d'échantillons de sol en unités pédologiques spectrales (Tableau 4.13). Nous indiquons ainsi la nature du minéral (para)cristallin principal par une lettre majuscule (A : allophanes ; G : gibbsite ; H : halloysite) et l'information minéralogique secondaire, si identifiée, par une lettre minuscule (a : allophanes ; g : gibbsite ; h : halloysite hydratée (10Å) ; i : argiles 2:1 ou 2:1:1 en couches interstratifiées). Le groupe 2 étant constitué d'échantillons extraits des cônes de déjection des cirques, est nommé « P » pour « sols peu évolués d'apports ». Cette dénomination ne définit pas un type de sol d'un référentiel pédologique quel qu'il soit. Pour comparer et discuter les stocks de COS de ces unités par rapport à ceux obtenus dans d'autres études, nous avons établi une correspondance avec les classes de sol de l'IPCC (VOL : volcanic soil ; HAC : high activity clay et LAC : low activity clay) suivant les critères de l'IPCC (2006) et de l'étude de Powers et al. (2011) . La CEC de l'halloysite pouvant varier de 2 à 60 cmol kg^{-1}, Herbillon and Delvaux, 1990 l'ont classé comme un minéral à la frontière entre LAC and HAC (Joussein et al., 2005). Cependant, si les CEC des unités à halloysite observées dans ce jeu de données sont assez élevées et semblent s'expliquer par le climat tropical (Joussein et al., 2005), seul l'unité Hi, avec la présence probable d'argiles 2 :1 ou 2 :1 :1 (Delvaux et al., 1990; Joussein et al., 2005; Quantin et al., 1984), présente une CEC moyenne supérieure à 24 cmol kg^{-1} et a donc été classé dans la catégorie HAC. Les autres unités à halloysite (6, 7 et 8) ont été classées dans la catégorie 'LAC' et les unités à caractère andique (1, 3, 4 et 5) ont été classées dans la catégorie 'VOL'. L'unité P présentant de fortes variabilités à la fois minéralogique et physico-chimique, n'a pas été classée selon la nomenclature IPCC.

De plus, les statistiques descriptives des teneurs en carbone, densités apparentes, CEC et stocks de COS sont également décrites dans le Tableau 4.13 et complètent la description de ces 9 unités pédologiques spectrales.

TABLEAU 4.13 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET DENOMINATION DES UNITES PEDOLOGIQUES SPECTRALES

Groupe d'échantillons	COS ($g\ kg^{-1}$)	Densité apparente ($g\ cm^{-3}$)	CEC ($cmol\ kg^{-1}$)	Stock de COS ($MgC\ ha^{-1}$)		Effectif	Noms	Classes IPCC
	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Ecart-type			
1	31,19	1,05	3,29	97,78	26,80	68	**Ga**	VOL
2	39,08	1,05	13,60	115,11	58,33	75	**P**	-
3	85,51	0,85	8,39	214,34	64,00	168	**Aa**	VOL
4	44,37	0,98	14,35	129,49	46,28	84	**A**	VOL
5	54,31	0,96	3,99	153,86	47,12	88	**Ag**	VOL
6	29,05	1,08	5,74	94,25	24,29	74	**Gh**	LAC
7	22,65	1,14	11,75	76,84	21,90	222	**H**	LAC
8	30,39	1,16	14,77	105,39	32,54	106	**Hh**	LAC
9	25,74	1,15	24,32	88,04	38,52	79	**Hi**	HAC

La pédologie spectrale couplée à une classification non supervisée a montré sa pertinence pour définir des unités pédologiques contenant des informations minéralogiques et organiques distinctes le long d'un gradient d'altération liée à une pédogenèse volcanique tropicale.

4.2.3.1.5 Résultat de la stratification : les unités pédoclimatiques

Les unités pédologiques spectrales sol étant caractérisées et dénommées, l'objectif est ensuite de délimiter les contours géographiques des unités pédologiques spectrales en augmentant la densité de points. Un modèle de prédiction des unités pédologiques spectrales par algorithme RandomForest (erreur : 28.5%), construit sur les 962 échantillons de sol, a permis d'affecter une unité pédologique spectrale aux 7780 échantillons restants du jeu de données, à partir de plusieurs co-variables liées aux propriétés des sols et leur pédogenèse (Figure 4.38).

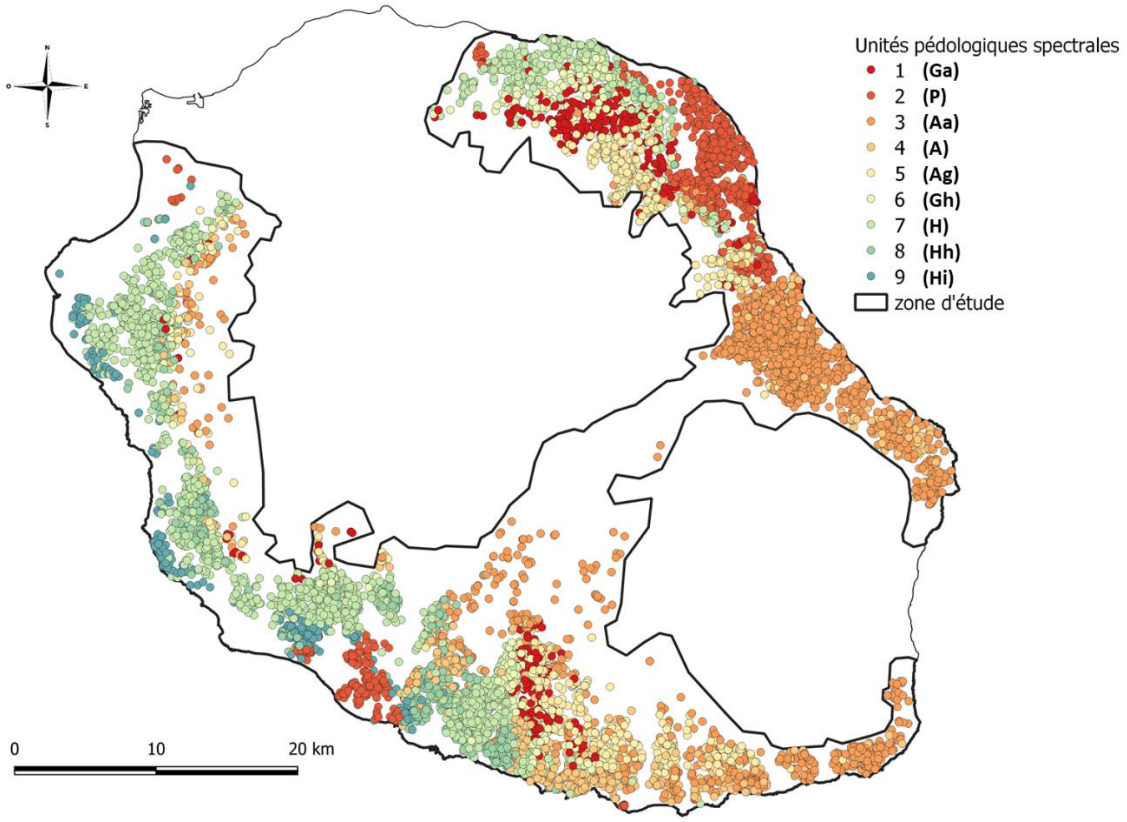


FIGURE 4.38 : CARTE DES ECHANTILLONS DE LA BASE DE DONNEES CLASSES SELON LEUR UNITE PEDOLOGIQUE SPECTRALE

A ce stade, chaque échantillon de sol est caractérisé par un usage renseigné dans la base de données et une unité pédologique spectrale suite au modèle RandomForest. Chaque échantillon étant géoréférencé, une jointure spatiale avec la carte des unités climatiques de l'IPCC de La Réunion permet d'affecter à chaque point le climat IPCC correspondant. La densité apparente moyenne du groupe d'échantillons de sol a ensuite été affectée à chacun des échantillons de la base de données afin de calculer le stock de carbone organique de l'échantillon en MgC ha^{-1}. Chaque échantillon de sol étant caractérisé par une unité pédologique, une unité climatique et un mode d'usage, un stock moyen (±écart-type) de COS en (MgC ha^{-1}) a pu être calculé selon cette combinaison. Ces résultats permettront ensuite d'évaluer les différences de stocks de COS entre usages agricoles pour chaque combinaison d'unité pédologique et climatique.

Afin de calculer les quantités de carbone organique du sol stocké dans les sols agricoles réunionnais, le semis de points des échantillons de sols doit être traduit en unités surfaciques. La transformation des points en polygones a été réalisée par la méthode des polygones de Voronoï. Cependant, la carte ainsi créée présente une mosaïque de très petites unités de sol enclavées dans d'autres unités de sol. Ce sur-fractionnement est dû à la variabilité kilométrique voire hectométrique des types de sol à La Réunion. Une simplification a été opérée en supprimant les points à l'origine de ces petites unités de sol, dans la limite de surface maximale de 50ha ; 7222 points ont ainsi été conservés pour cartographier les unités pédologiques spectrales par la méthode des polygones de Voronoï. La carte des unités climatiques IPCC (n=4) a ensuite été intersectée avec la carte des unités pédologiques spectrales (n=9) pour cartographier les unités spatialement homogènes vis-à-vis du carbone organique du sol que sont les unités pédoclimatiques (n=29) (Figure 4.39). La stratification du territoire à partir des déterminants du carbone organique du sol (COS) a permis de définir des unités spatiales homogènes (unités pédoclimatiques) vis-à-vis du carbone organique du sol.

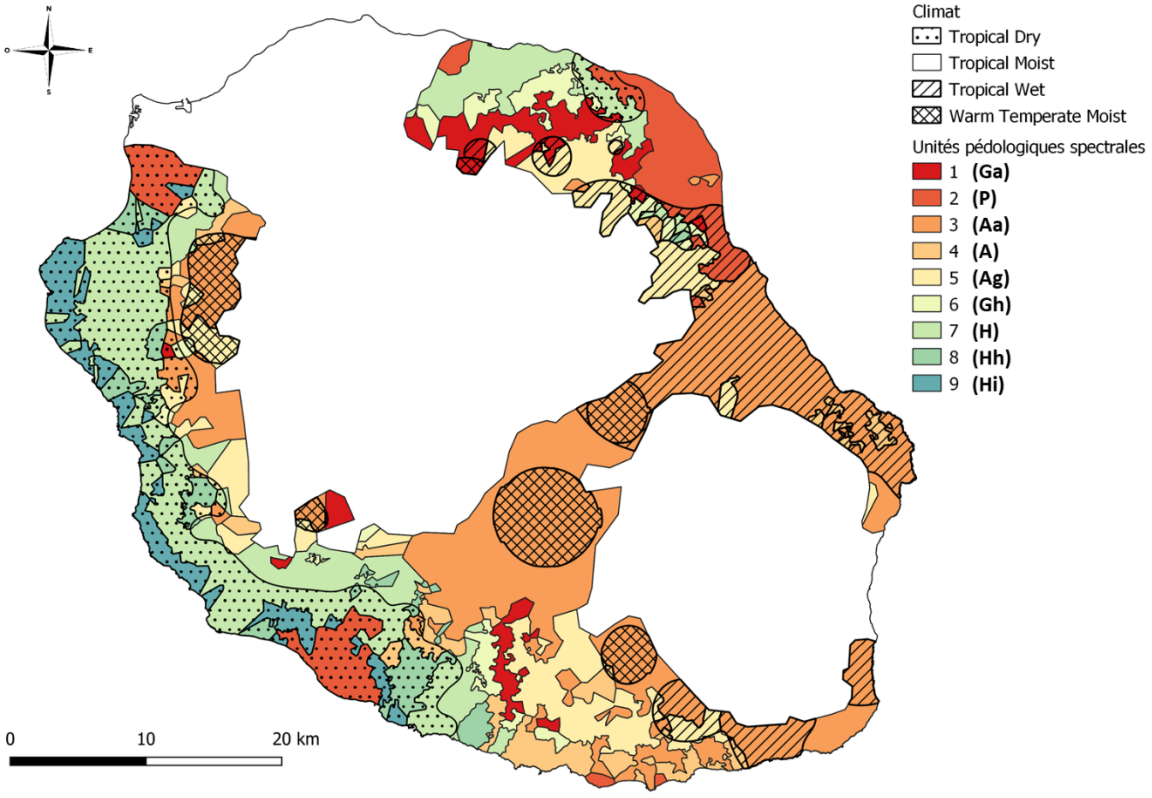


FIGURE 4.39 : CARTOGRAPHIE DES 29 UNITÉS PÉDOCLIMATIQUES

4.2.3.2 Les stocks (MgC ha^{-1}) et quantités de carbone (MgC) organique des sols agricoles par unité pédoclimatique

Dans un objectif de quantification du COS dans les sols agricoles, chaque échantillon de sol a été caractérisé par son usage identifié dans la base de données et par une unité pédoclimatique à partir de la carte des unités pédoclimatiques (Figure 4.39) afin de calculer un stock moyen (±écart-type) de carbone organique en MgC ha^{-1} selon cette combinaison. D'autre part, la carte des surfaces agricoles a été intersectée avec la carte des unités pédoclimatiques. Chaque nouveau polygone est ainsi caractérisé par une combinaison pédologie, climat et usage. Le stock de COS moyen (± écart-type) (MgC ha^{-1}), calculé à partir de la base de données pour chaque combinaison, est affecté à chaque polygone selon sa propre combinaison pédologie, climat et usage (Figure 4.40). Ainsi, une quantité de COS (MgC) peut être calculé en multipliant le stock de carbone moyen (MgC ha^{-1}) par la surface (ha^{-1}) de chaque polygone. La stratification du territoire selon les unités pédoclimatiques et la carte des usages agricoles, a donc permis d'estimer les quantités de carbone organique des sols agricoles de La Réunion (Tableau 4.14).

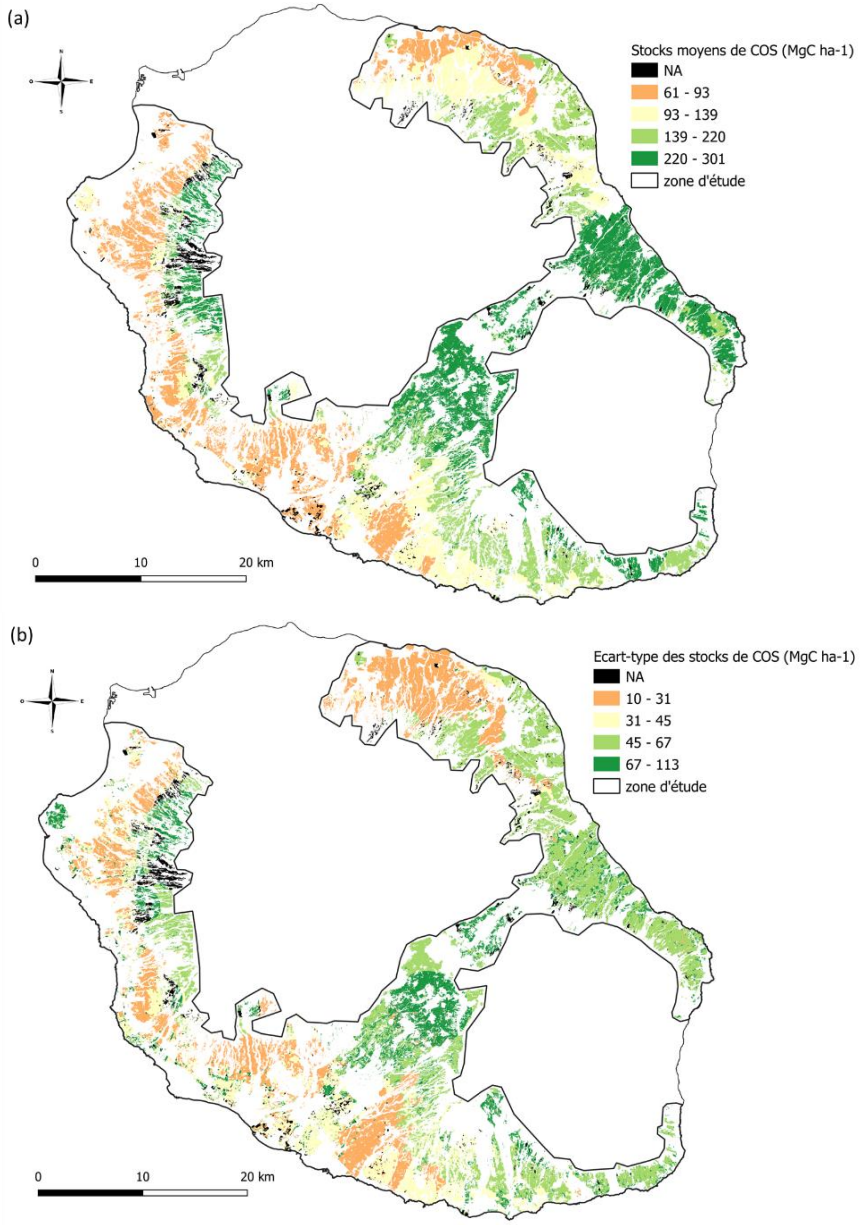


FIGURE 4.40 : CARTE DES STOCKS MOYENS DE COS (MGC HA^{-1}) (A) ET DE LEUR ECART-TYPE (MGC HA^{-1}) (B)

Les stocks de carbone moyens par unité pédoclimatique et usage des sols de La Réunion varient de 61 à 301 MgC ha^{-1} et un stock moyen, sols et usages confondus, de 134 ± 44 MgC ha^{-1} (Cf. Données supplémentaires « Stocks de COS »). Sous canne à sucre, culture majoritaire et présente dans toutes les unités pédoclimatiques, les stocks de carbone moyens par unité pédoclimatique varient de 83 à 224 MgC ha^{-1}.

Les sols agricoles de La Réunion ont un stock de carbone total de 7.6 millions de tonnes de carbone sur 0-30cm de profondeur pour une surface de 46 536 ha (Tableau 4.14). Toutefois, ce calcul ne prend en compte que les surfaces agricoles pour lesquelles un stock moyen de carbone a pu être renseigné, cela représente 95,4 % de la surface agricole. En effet, le stock de COS n'a pas pu être calculé sur 2228 ha des 48 764 ha de surface agricole en raison d'un nombre insuffisant d'analyses de sol. Le carbone contenu dans les trente premiers centimètres des Andosols (3, 4 et 5) représente 71 % du carbone des sols et 54 % des surfaces du terroir agricole. Les sols à halloysite (7, 8 et 9) représentent l'autre part importante du carbone du sol (17%) sur 29% des surfaces agricoles tandis que les sols à gibbsite (1 et 6) représentent 6% de la quantité de carbone du sol pour 10% des surfaces. Les autres sols (2), sols des cônes de déjections des rivières, s'étendent sur 8% des surfaces pour une quantité de carbone représentant 6% du total (Tableau 4.14). La masse de carbone du sol sous canne à sucre, base du système agricole réunionnais, 55% du territoire selon les données d'occupation du sol issues de la télédétection, représente près de la moitié de la quantité totale de carbone du terroir agricole (47%). Quant aux prairies, elles stockent 26% du carbone pour seulement 16% de la surface agricole. Pour les autres modes d'usages, la part de la quantité totale de carbone équivaut aux pourcentages des surfaces occupées (ananas : 1% ; maraichage : 6% ; verger : 21%). A noter que les surfaces présentées ici sont les surfaces pour lesquelles des quantités de carbone ont pu être définies (Tableau 4.14).

TABLEAU 4.14 : QUANTITES DE COS PAR UNITE PEDOLOGIQUE SPECTRALE ET PAR USAGE AGRICOLE

	Quantité de COS		Surfaces			Quantité de COS		Surfaces	
Groupe de sol	MgC	%	ha	%	**Usage**	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	

4.2.3.3 Les Δstocks de carbone organique du sol entre usages agricoles par unité pédoclimatique

La canne à sucre, cultivée à La Réunion depuis plus de 200 ans, est considérée comme l'antécédent cultural pour toutes les parcelles agricoles ayant un autre usage aujourd'hui. Encore cultivée sur 60% de la surface agricole de l'île, selon des pratiques conservatrices vis-à-vis du carbone (restitution de la paille au sol, sans brûlis, pas de travail du sol hormis à la replantation tous les 7 ans en moyenne), la canne à sucre est considérée comme la référence pour le calcul des Δstocks (Stock COS autre usage - Stock COS canne à sucre) de carbone organique du sol dans toutes les unités pédoclimatiques où la culture de la canne est dominante. La notion de référence pour l'usage canne à sucre est soutenue par le fait que les teneurs en carbone du sol sous cet usage ne varient que très peu dans le temps (Allo et

al., 2017) pour un type de sol donné, et le stock de carbone du sol sous canne à sucre est donc considéré comme étant à l'équilibre pour une unité pédoclimatique donnée.

Afin d'atténuer la variabilité de la teneur en carbone du sol, inhérente à la variabilité locale des propriétés des sols, une approche spatiale par une méthode « des voisins » a permis de sélectionner des couples d'échantillons (canne et autre usage) dans un périmètre de 1km de diamètre (« buffer »). Une différence de stock de carbone organique du sol (Δstock = Stock COS autre usage - Stock COS canne à sucre) est calculée dans chaque buffer. La moyenne (± écart-type) des Δstocks de COS a ensuite été calculée pour chaque unité pédoclimatique et chaque usage, associée à un test de Student afin de tester si cette moyenne des Δstocks pour chaque unité pédoclimatique et chaque usage était significativement différente de zéro. Cette approche a permis de tester 552 couples canne à sucre – autres usages (Cf. Données supplémentaires « Différences de stocks de COS »), sur l'ensemble du territoire agricole dont 253 ont été retenus car présentant une différence de stock de COS statistiquement significative (Figure 4.41).

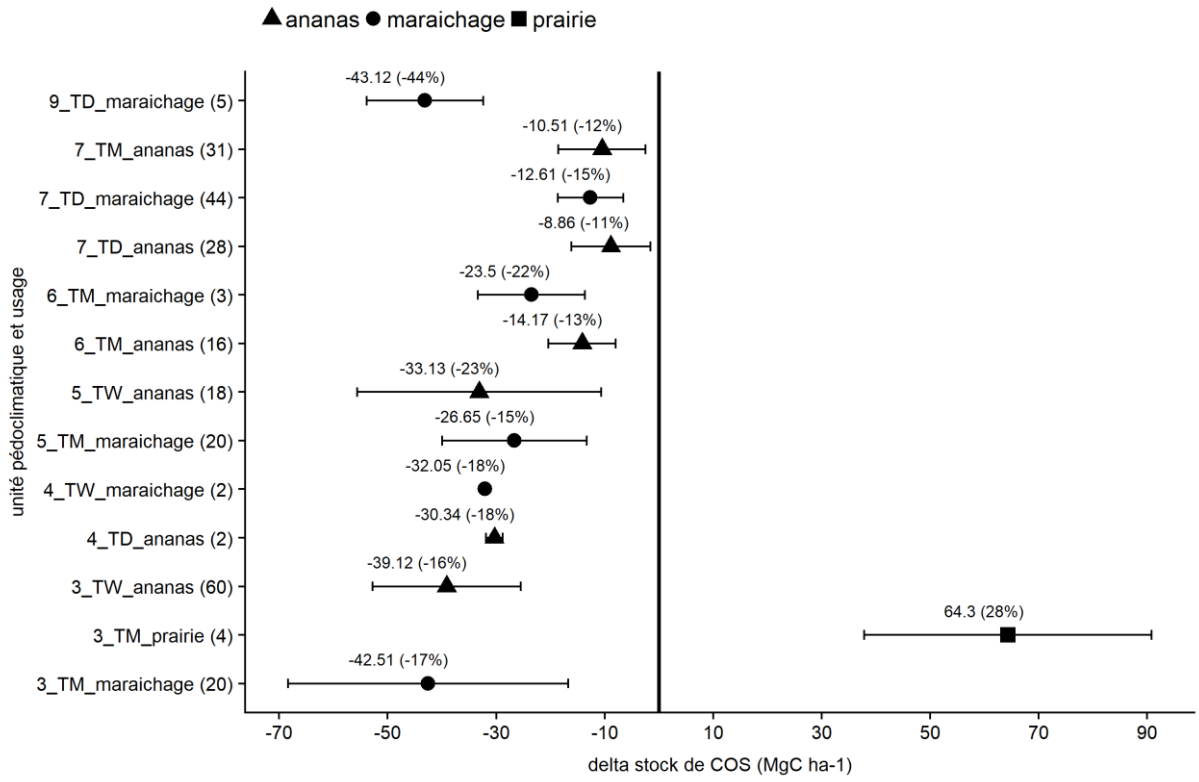


FIGURE 4.41 : DIFFERENCE MOYENNE DE STOCK DE COS (ΔSTOCKS) (MGC HA^{-1}) (SUR 0- 30 CM DE PROFONDEUR) SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENTE DE ZERO PAR UNITE PEDOCLIMATIQUE ET USAGE AVEC INTERVALLE DE CONFIANCE A 95%. LE NOMBRE D'ECHANTILLONS 'AUTRE USAGE' UTILISE POUR CALCULER LA MOYENNE DES DIFFERENCES DE STOCKS DE COS PAR UNITE PEDOCLIMATIQUE ET USAGE EST INDIQUE ENTRE PARENTHESES SUR L'AXE DES ORDONNEES. LE POURCENTAGE INDIQUE ENTRE PARENTHESES SUR LE GRAPHIQUE A DROITE DU ΔSTOCK MOYEN CORRESPOND AU COEFFICIENT DE VARIATION PAR RAPPORT AU STOCK DE CANNE A SUCRE.

Le Δstock moyen, toutes unités pédoclimatiques et usages confondus, est de -19 MgC ha^{-1} (– 26 MgC ha^{-1} hors prairie), indiquant que les stocks de canne à sucre sont plus élevés que les autres usages, excepté pour le stock de carbone organique du sol de la prairie dans l'unité pédoclimatique '3_TM'. De manière générale, les modes d'usage autres que canne à sucre montrent des stocks de carbone organique du sol nettement inférieurs à ceux de la référence. Cette différence de stocks de COS peut atteindre plus de 40 % du stock initial. Le déstockage moyen de l'usage « ananas » est de -23 MgC ha^{-1} tandis que le déstockage moyen du maraichage est de -30 MgC ha^{-1}, toutes unités pédoclimatiques confondues. Toutefois la prairie présente une augmentation significative du stock de carbone de près de 28 %, pour une seule unité pédoclimatique du dispositif étudié. L'analyse des Δstocks par type de sol et de climat, tous changements d'usages confondus (hors cas particulier de la prairie), semble indiquer que le déstockage du carbone organique du sol est plus important dans le climat le plus humide (Tropical Wet) avec un déstockage moyen de -35 MgC ha^{-1} que dans les climats Tropical Dry et Tropical Moist (-24 MgC ha^{-1} et -23 MgC ha^{-1}). Les sols andiques à allophanes (3,4 et 5) semblent également plus sensibles au déstockage de carbone que les sols à halloysite (6,7) avec des déstockages moyens de -33 MgC ha^{-1} et -14 MgC ha^{-1}), respectivement. Le type de sol '9' présente quant à lui, le déstockage le plus important (-43 ±12 MgC ha^{-1}) et correspond à une situation de maraichage dans le climat 'Tropical Dry'.

4.2.4 Discussion

4.2.4.1 Une variabilité des teneurs en carbone organique du sol diminuée par la prise en compte des facteurs biophysiques dans la stratification du territoire

Comme décrit par Powers et al. (2011) pour l'ensemble des tropiques, les deux principaux facteurs biophysiques influençant les stocks de carbone organique du sol sont la pluie moyenne annuelle et la minéralogie des sols. Dans cette étude, la minéralogie des sols est prise en compte dans les unités pédologiques spectrales à travers l'information minéralogique contenue dans les spectres moyens infra-rouge et la pluie moyenne annuelle dans le climat. La prise en compte de ces deux déterminants principaux a effectivement permis de stratifier le territoire en unités spatialement homogènes (unités pédoclimatiques) vis-à-vis du carbone afin de pouvoir calculer des stocks et variations de stocks de carbone du sol représentatifs de ces unités. La création d'unités pédologiques à partir d'informations spectrales dans le moyen infrarouge a permis de réduire la variabilité des teneurs en carbone par rapport aux classifications pédologiques existantes. L'analyse des coefficients de variations et des écarts interquartiles par classe de sol pour chacune des classifications a effectivement montré une diminution de ces indicateurs de la variabilité des teneurs en carbone depuis la carte morpho-pédologique simplifiée jusqu'aux unités pédologiques spectrales (Figure 4.42). En effet, le coefficient de variation (« cv ») (et l'écart inter-quartile « iqr ») moyen diminue de 0,45 (2,42) pour la carte morpho-pédologique simplifiée à 0,32 (1,74) pour les unités pédologiques spectrales. Les unités pédologiques spectrales, définies à partir de spectres MIR semblent donc mieux adaptées que les anciennes classifications pour discriminer les sols en fonction de leur teneur en carbone tout en réduisant la variabilité à l'intérieur des classes de sols. De plus, la variabilité des teneurs en carbone est encore réduite par la stratification en unités spatiales homogènes, que sont les unités pédoclimatiques (cv= 0,28 et iqr =1,60).

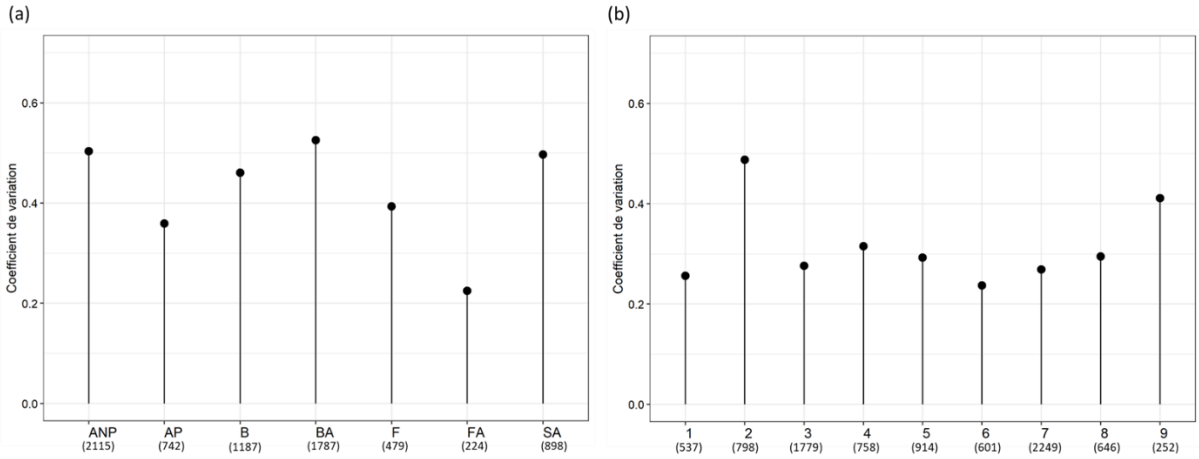


FIGURE 4.42 : COEFFICIENTS DE VARIATION DES TENEURS EN COS PAR TYPE DE SOL POUR LA CARTE MORPHO-PEDOLOGIQUE SIMPLIFIEE (A) ET POUR LA CARTE DES UNITES PEDOLOGIQUES SPECTRALES (A). LES EFFECTIFS SONT INDIQUES ENTRE PARENTHESES

4.2.4.2 Des stocks de carbone organique du sol élevés à La Réunion

Les valeurs de stocks de COS des sols agricoles de La Réunion (0-30 cm de profondeur), bien que certainement surestimées par la non prise en compte systématique des éléments grossiers, sont élevées. A titre indicatif, le stock de COS moyen sous canne à sucre à La Réunion est de 131 MgC ha^{-1} alors qu'en métropole, le stock moyen de COS sous grandes cultures dans l'horizon 0-30 cm est de 53 MgC ha^{-1} (Tosser et al., 2014).

Dans une étude, Batjes (2011) présente une estimation des stocks de carbone organique du sol sous végétation naturelle par type de sol et par climat IPCC Tier1. En classant les groupes de sols de cette étude en classe de sol IPCC (Tableau 4.13), il est possible de comparer les stocks de carbone organique de La Réunion avec ces estimations (Tableau 4.15). De manière générale, les stocks de carbone organique sur 0-30cm sous canne à sucre de La Réunion sont de 1,2 à 5,3 fois plus élevés que les estimations des stocks sous végétation naturelle (Batjes, 2011) que ce soit par type de sol et/ou par climat IPCC et de 1,2 à 2,9 fois plus élevés pour les estimations des stocks de carbone organique de l'IPCC 2006 par sol-climat.

TABLEAU 4.15 : COMPARAISON DES STOCKS DE COS PAR CLASSE DE SOL ET PAR CLIMAT IPCC

MgC ha-1	**Batjes, 2011 (végétation naturelle)**		**Batjes, 2011 (IPCC 2006)**	**Cette étude (canne à sucre)**
SOC stock (0-30 cm)	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Moyenne
SOL				
HAC	49	47		86
LAC	46	32		102
VOL	127	84		155
CLIMAT				
TD	22	23		117
TM	50	54		130
TW	61	45		137
WTM	76	58		224
SOL-CLIMAT				
HAC TD	21	13	38	86
LAC TW	52	25	60	105
LAC TM	38	19	47	104
LAC TD	19	11	35	98
VOL TW	77	40	130	154
VOL TM	NA	NA	70	142
VOL TD	NA	NA	50	146
VOL WTM	138	56	80	224

Une comparaison des stocks de La Réunion avec des stocks de pédogenèses volcaniques tropicales similaires (Martinique, Guadeloupe) semblent également montrer des stocks de 1,8 à 2,3 fois plus élevés que ceux mesurés à La Martinique par type de sol (Albrecht et al., 1992; Blanchart and Bernoux, 2005) et à La Guadeloupe par type de sol et usage (J. Sierra et al., 2015) (Tableau 4.16). Une hypothèse à ces différences de stocks de COS est la différence de climats entre La Réunion et les Antilles, notamment dans les zones agricoles. Les pluviosités annuelles sont plus élevées à La Réunion que dans les Antilles. Les températures moyennes annuelles à La Martinique et à La Guadeloupe sont nettement (25 à 26°C) supérieures aux températures moyennes annuelles à La Réunion. De plus, les températures moyennes annuelles dans les hauteurs de La Réunion où l'on retrouve des prairies et du maraichage notamment, sont faibles (comprises entre 12 et 18 °C) et caractéristiques d'un climat tempéré. Un climat plus humide et moins chaud à La Réunion peut expliquer une minéralisation plus faible et des stocks de COS plus élevés que dans les Antilles.

TABLEAU 4.16 : COMPARAISON DES STOCKS DE COS (MGC HA^{-1}) DANS LES ANTILLES

			Martinique (Blanchart, 2005)	**Cette étude (0-30cm)**
Sol	Usage	Profondeur (cm)	Moyenne	Moyenne (tous usages confondus)
Andosols (VOL)		0-30	74	168
Sols bruns halloysite (LAC)		0-30	48	102
			Guadeloupe (Sierra, 2015)	**Cette étude (0-30cm)**
Andosol (VOL)	Maraichage	0-25	103	181
Nitisol (halloysite) (LAC)	Maraichage	0-25	55	99

A Taïwan, sur un gradient d'altération de sols volcaniques en climat subtropical humide (Tsui et al., 2013), les stocks de carbone organique du sol sur 0-30 cm varient de 47,5 ± 42,1 MgC ha^{-1} à 126 ± 27 MgC ha^{-1} et sont donc globalement plus faibles que les stocks des sols agricoles de La Réunion. Au Cameroun, de bas en haut de la topo-séquence (Andosols – Ferralsols) du Mont Bambouto (Tsozué et al., 2019), sous une végétation naturelle et/ou anthropisée et un climat tropical, les stocks de carbone organique varient de 86 ± 3 MgC ha^{-1} à 194 ± 20 MgC ha^{-1}, et sont globalement dans la même gamme que les stocks des sols agricoles de La Réunion qui varient, sous canne à sucre, de 83 à 224 MgC ha^{-1}.

Dans le cas particulier des Andosols aluandiques de cette topo-séquence (Tsozué et al., 2019), les stocks de carbone organique su sol (de 154 ± 23 MgC ha^{-1} à 195 ± 20 MgC ha^{-1}) sont similaires aux stocks de COS des Andosols de La Réunion dont le stock est en moyenne de 168 MgC ha^{-1} (Tableau 8). Dans les îles Canaries, le stock de carbone organique du sol des Andosols allophaniques sous forêt (227 ± 70 MgC ha^{-1}) (Rodríguez Rodríguez et al., 2006) est plus élevé que la moyenne des stocks de COS des Andosols de La Réunion (168 MgC ha^{-}1) tandis qu'au Japon, le stock moyen de carbone organique des Andosols sous forêt est de 130 MgC ha^{-1} et les stocks varient de 112 MgC ha^{-1} dans les sols agricoles (riz, culture annuelle) à 154 MgC ha^{-1} dans les prairies (Takahashi et al., 2010) ; ils sont donc globalement plus faibles que ceux de La Réunion. En Italie, sous le maquis et les châtaigniers des pentes de l'Etna, les stocks de carbone organique des Andosols sont élevés et dans la gamme des Andosols de La Réunion avec des stocks compris entre 150 et 200 MgC ha^{-1} (Egli et al., 2008).

Ces stocks de carbone du sol élevés s'expliquent par les formes minérales paracristallines (proto-imogolites, imogolites, allophanes) présentes dans les Andosols qui sont très efficaces pour stabiliser la matière organique du sol (Torn et al., 1997) dans des nano-complexes organo-minéraux présentant de fortes teneurs en C. De plus, les proto-imogolites, considérés comme le précurseur des imogolites et allophanes, seraient prépondérants dans les Andosols réunionnais par rapport à des allophanes ou

imogolites riches en Al (Levard et al., 2012). Or ces phases cristallisées à courte distance complexent la MO avant d'avoir atteint les stades de l'imogolite ou de l'allophane. Ces interactions ont pour effet de stabiliser la matière organique du sol (MOS) jusqu'à plusieurs milliers années (temps moyen de résidence d'environ 163 000 ans) et de bloquer l'altération des phases minérales secondaires (allophanes) (Basile-Doelsch et al., 2005b; Levard et al., 2012). Basile-Doelsch et al. (2015) ont également montré que la gibbsite et l'halloysite complexent la MOS en quantité moins importante que les formes minérales paracristallines. Ces mécanismes de protection de la MOS au sein de complexes organo-minéraux peuvent ainsi expliquer les valeurs élevées des stocks de COS à La Réunion et leurs variations suivant les types de sol. D'autre part, le climat plus humide et moins chaud à La Réunion que dans les Antilles par exemple, peut expliquer les valeurs élevées des stocks de COS à La Réunion.

Les stocks de carbone organique des sols agricoles de La Réunion sont donc très élevés quels que soient les types de sol ou les usages auxquels ils sont comparés. Des mesures de stocks de COS sous forêt à La Réunion permettraient de les comparer aux stocks sous végétation naturelle d'autres pays mais également de les comparer aux stocks de carbone organique du sol sous canne à sucre à La Réunion, supposés à l'équilibre. Cependant de telles mesures restent difficiles à réaliser car le territoire est très anthropisé ; seules les zones peu cultivables, comme les jeunes coulées de lave peu altérées sont des zones forestières dans les bas de versant, près des zones agricoles cultivées notamment en canne à sucre.

4.2.4.3 La stratification du territoire : évaluer les effets des changements d'usage sur les stocks de carbone organique du sol

4.2.4.3.1 Des stocks de carbone organique du sol vulnérables aux changements d'usages

L'étendue des variations de stocks de carbone organique du sol liées à des changements d'usages des sols agricoles à La Réunion est importante, allant de -44 à +28 % du stock initial. A l'échelle mondiale, la méta-analyse de Guo and Gifford (2002) basée sur 74 publications, montre une gamme de variation des stocks de carbone encore plus importante allant de -59% à +53% du stock de carbone initial. Sous les tropiques, une méta-analyse sur 385 études (Don et al., 2011), montre des variations de stocks de -30% à +50% pour une profondeur moyenne de 32 cm. Les pertes les plus importantes de carbone sont liées à des changements d'usages de la forêt primaire vers des cultures pérennes (-30%) ou vers des cultures annuelles (-25%) tandis que les gains les plus importants de carbone correspondent à un changement d'usage de culture annuelle vers une forêt secondaire (+50%). Bien que cette étude ne prenne pas en compte les sols sous forêt, il est intéressant de noter que les variations relatives des stocks de carbone organique du sol entre changements d'usages sont similaires. Cependant, en valeurs absolues, les variations des stocks de La Réunion varient de manière plus importante (-43 à + 64 MgC ha^{-1}) comparativement aux variations observées dans les tropiques (-32 à +33 MgC ha^{-1}) (Don et al., 2011) ou en Europe (-19 à + 21 MgC ha^{-1}) (Poeplau and Don, 2013), ceci étant probablement dû aux stocks très élevés des sols de La Réunion.

Sous les tropiques, les variations de stocks de COS dans les sols cultivés sont majoritairement déterminées par les entrées de carbone dans le sol, le temps et les pratiques agricoles (Fujisaki et al., 2018). Or, ces informations ne sont pas décrites de manière détaillée dans la base de données d'analyses de sol. Cependant, à La Réunion, les usages ananas et maraichage apportent des quantités de biomasse au sol, aérienne ou racinaire, inférieures à celles de l'antécédent cultural qu'est la canne à sucre, notamment en raison des pratiques agricoles sous canne à sucre à La Réunion (paillage du sol, faible intensité de travail du sol (une fois tous les 7 ans en moyenne à la replantation)). En termes de temps, bien que la durée de l'usage ananas ou maraichage ne soit pas connue, des mesures de stocks

de COS sous culture d'ananas et de maraichage d'une durée de 10 ans environ montre des variations de stocks de COS du même ordre de grandeur. Quant à la vulnérabilité des sols à caractère andique aux changements d'usages, elle peut s'expliquer par la sensibilité des Andosols à la dessiccation entrainant une collapse irréversible des produits amorphes (Perret, 1992), à une sensibilité à l'érosion en nappe et à la minéralisation lorsque le travail du sol est fréquent, tel qu'il peut l'être dans les systèmes maraichers.

A La Réunion, l'étude de Basile-Doelsch et al. (2009) a montré, sur un Ferralsol non cultivé (forêt secondaire avec verger de manguier actuellement) et un Ferralsol cultivé en canne à sucre depuis 186 ans, que 58 à 80% de la MO était stabilisée au sein de complexes organo-minéraux selon l'horizon considéré. L'étude montre que la mise en culture a des effets sur les complexes organo-minéraux à plusieurs niveaux : la mise en culture pourrait affecter les minéraux (modification de la stabilité des phases minérales par dissolution ou néoformation), les complexes organo-minéraux (migration verticale des complexes organo-minéraux avec accumulation dans les horizons profonds. Ce résultat montre ainsi que si la stabilisation du carbone est importante dans les complexes organo-minéraux des sols de La Réunion, elle n'en reste pas moins vulnérable à des changements d'usages des sols pouvant affecter la stabilité de ces complexes organo-minéraux, donc de la protection de MO vis-à-vis de la minéralisation. L'étendue des variations des stocks de carbone organique liées à des changements d'usages des sols agricoles à La Réunion est très importante, faisant des sols agricoles de La Réunion des sols vulnérables aux changements d'usages. Cette sensibilité au déstockage de carbone semble être plus importante pour les sols à caractère andique de La Réunion d'après ces premiers résultats. Or, ces sols contiennent plus des trois quarts (76%) des quantités de carbone contenues dans les sols agricoles réunionnais.

4.2.4.3.2 Des effets de changements d'usage difficiles à évaluer en raison de l'hétérogénéité spatiale du carbone

4.2.4.3.2.1 Biais géographique : une hétérogénéité spatiale résiduelle

Si la stratification à partir des déterminants du carbone organique du sol permet effectivement de réduire la variabilité du carbone du sol par unité pédoclimatique, une approche spatiale avec création d'une zone tampon de 1 km autour des usages autres que canne à sucre a été utilisée pour sélectionner des échantillons de canne à sucre à l'intérieur de cette zone et ainsi évaluer plus précisément l'effet 'mode d'usage' sur les stocks de carbone organique du sol pour une unité pédoclimatique donnée.

En effet, il existe une variabilité résiduelle des stocks de carbone du sol à l'intérieur d'une unité pédoclimatique, qui couplée à l'hétérogénéité spatiale des différents usages agricoles ne permet pas de détecter les variations de stocks de carbone organique du sol entre usage à l'échelle de l'unité pédoclimatique. Très peu de variations de stocks entre usages (entre un usage canne à sucre et un autre usage (ananas, arboriculture, maraichage, prairie)) sont effectivement détectées à l'échelle du pédoclimat, sans adopter une approche par buffer (Tableau 4.17). Ce résultat soulève également le problème de répartition spatiale des usages des terres agricoles, l'unité pédoclimatique « 3_TM » en étant l'illustration. En effet, pour l'unité pédoclimatique « 3_TM », dans le cas d'un changement d'usage de canne à sucre vers du maraichage, on observe un déstockage de COS de -42 MgC ha^{-1} avec la méthode des buffers alors que la comparaison à l'échelle de l'unité pédoclimatique indique un stockage de COS de 22 MgC ha^{-1}. Or dans cette zone, les zones cultivées en canne à sucre sont éloignées des zones maraichères bien que dans la même unité pédoclimatique. Une comparaison de ces stocks serait ainsi biaisée du fait de la dissociation spatiale de ces usages.

TABLEAU 4.17 : DIFFERENCE DE STOCKS DE COS (ΔSTOCK = STOCK COS AUTRE USAGE - STOCK COS CANNE A SUCRE) MOYENNE (EN MGC HA^{-1}) SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENTE DE ZERO, PAR UNITE PEDOCLIMATIQUE, ET CALCULEE SANS ADOPTER UNE APPROCHE PAR BUFFER.

Unité pédoclimatique	Usage	Nombre d'échantillons 'autre usage que canne à sucre'	Différence de stock COS (MgC ha^{-1})	p-value (ANOVA)
3_TM	Maraichage	54	22,34	0,00899
	Prairie	15	94,1	< 0.001
	Arboriculture	31	32,01	0,02608
3_TW	Ananas	60	-23,77	0,0168
5_TW	Ananas	19	-36,89	0,00281
7_TD	Maraichage	45	-10,05	0,00769

4.2.4.3.2.2 Biais de l'échantillonnage

Un nombre suffisant d'échantillons de sols pour chaque usage est nécessaire afin de pouvoir évaluer les effets des changements d'usage des sols sur les stocks de carbone organique du sol par unité spatiale homogène. Or, dans notre jeu de données, les usages autres que la canne sont sous-représentés. En effet, l'analyse de sol sous canne à sucre est une obligation règlementaire européenne pour pouvoir bénéficier d'une subvention à la replantation ce qui induit une sur-représentation des analyses de sol sous culture de canne à sucre dans la base de données. Ces premiers résultats mériteraient d'être complétés par de nouvelles analyses de sol pour les usages agricoles autre que la culture de la canne à sucre afin de renseigner les variations de stocks dues aux changements d'usages des sols pour l'ensemble des combinaisons unités pédoclimatiques x changements d'usages des sols agricoles de La Réunion. D'autre part, les effets des changements d'usage sur les stocks de carbone organique sont évalués en synchronie dans cette étude et non en diachronie. Bien que le stock de COS sous canne à sucre soit considéré à l'équilibre en raison de la faible variation des teneurs en carbone par type de sol sur la période 1993 à 2017, et des pratiques conservatrices vis-à-vis du carbone à La Réunion, aucune mesure de stock n'a été réalisée dans le temps suivant un réel changement d'usage de la canne à sucre vers un autre usage agricole (diachronie).

4.2.5 Conclusion

En raison d'une forte variabilité des constituants physico-chimiques du sol dans un contexte de pédogénèse en zone volcanique tropicale, une méthodologie de stratification du territoire à partir des déterminants du carbone organique du sol (type de sol et climat) a été développée afin d'évaluer les effets des changements d'usage des sols sur les stocks de COS au sein d'unités spatiales homogènes vis-à-vis du carbone organique du sol, appelées unités pédoclimatiques.

Une classification non supervisée à partir de spectres MIR de sols, a permis de définir 9 unités pédologiques homogènes d'un point de vue spectral. Le stock de COS pour les 30 premiers cm du sol, a ainsi été calculé pour chaque échantillon de sol à partir de la teneur en COS issu de l'analyse de sol et de la valeur de la densité apparente de l'unité pédologique de l'échantillon. Des stocks de COS moyens par unité pédoclimatique et par mode d'usage ont ensuite été calculés. La spectroscopie moyen infrarouge, couplée à une classification non supervisée, a ainsi montré sa pertinence pour définir des unités pédologiques contenant des informations minéralogique et organique distinctes le long d'un gradient d'altération liée à la pédogenèse en zone volcanique tropicale de La Réunion ainsi que pour calculer des stocks de COS à l'échelle territoriale.

Le découpage du territoire selon les unités pédoclimatiques et la carte des usages agricoles, a ensuite permis d'affecter à chaque unité surfacique le stock de COS moyen de l'unité pédoclimatique et mode d'usage correspondant. Cette méthodologie a permis de quantifier le stock de COS total des sols agricoles de La Réunion (7.6 MtC). L'analyse des stocks de COS (taux de COS en MgC ha^{-1}) des sols agricoles de La Réunion a montré des stocks de COS très élevés mais qui restent vulnérables. En effet, les variations des stocks de COS à La Réunion entre usages agricoles ont été évaluées en synchronie par unité pédoclimatique et montrent des différences importantes entre le stock de COS de la canne à sucre et celui du maraichage ou de la culture de l'ananas. Ces variations importantes de stocks de COS (-19 MgC ha^{-1} en moyenne toutes unités pédoclimatiques et usages confondus) liées à des changements d'usages des sols agricoles indiquent que les sols agricoles de La Réunion sont vulnérables aux changements d'usages agricoles. Cette sensibilité au déstockage de carbone semble être plus importante dans les sols andiques de La Réunion qui contiennent plus des trois quarts des quantités de carbone contenues dans les sols agricoles réunionnais. D'autre part, une modification des conditions climatiques (baisse des précipitations et une augmentation des températures) liée au changement climatique pourrait également affecter les stocks de COS de La Réunion.

Références

Albrecht, A., Brossard, M., Chotte, J.-L., Feller, C., 1992. Les stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique (Petites Antilles) 14.

Allo, M., Albrecht, A., Légier, P., Gogé, F., 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., in: Abstract Book Pedometrics 2017. Presented at the Pedometrics 2017, Wageningen: Wageningen University and Research Centre, ISRIC, Wageningen (Pays-Bas)., p. 19.

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

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. European Journal of Soil Science 56, 689–703. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00703.x

Basile-Doelsch, I., Balesdent, J., Rose, J., 2015. Are Interactions between Organic Compounds and Nanoscale Weathering Minerals the Key Drivers of Carbon Storage in Soils? Environ. Sci. Technol. 49, 3997–3998. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00650

Basile-Doelsch, I., Brun, T., Borschneck, D., Masion, A., Marol, C., Balesdent, J., 2009. Effect of landuse on organic matter stabilized in organomineral complexes: A study combining density fractionation, mineralogy and δ13C. Geoderma 151, 77–86. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.008

Batjes, N.H., 2011. Soil organic carbon stocks under native vegetation – Revised estimates for use with the simple assessment option of the Carbon Benefits Project system. Agriculture, Ecosystems & Environment 142, 365–373. https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.06.007

Bellon-Maurel, V., Fernandez-Ahumada, E., Palagos, B., Roger, J.-M., McBratney, A., 2010. Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil

attributes by NIR spectroscopy. TrAC Trends in Analytical Chemistry 29, 1073–1081. https://doi.org/10.1016/j.trac.2010.05.006

Blanchart, E., Bernoux, M., 2005. DETERMINANTS DES STOCKS DE CARBONE DES SOLS DES PETITES ANTILLES (MARTINIQUE, GUADELOUPE). ALTERNATIVES DE SEQUESTRATION DU CARBONE ET SPATIALISATION DES STOCKS ACTUELS ET SIMULES.

Chang, C.-W., Laird, D.A., Mausbach, M.J., Hurburgh, C.R., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. Soil Science Society of America Journal 65, 480–490. https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652480x

Delvaux, B., Herbillon, A.J., Vielvoye, L., Mestdagh, M.M., 1990. Surface properties and clay mineralogy of hydrated halloysitic soil clays. II: Evidence for the presence of halloysite/smectite (H/Sm) mixed-layer clays. Clay miner. 25, 141–160. https://doi.org/10.1180/claymin.1990.025.2.02

Demattê, J.A.M., da Silva Terra, F., 2014. Spectral pedology: A new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations. Geoderma 217–218, 190–200. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.11.012

Don, A., Schumacher, J., Freibauer, A., 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis: SOIL ORGANIC CARBON AND LAND-USE CHANGE. Global Change Biology 17, 1658–1670. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x

Dupuy, S., 2018. Carte d'occupation du sol 2017 Spot6-7 (niveau 3) - CIRAD — AWARE [WWW Document]. URL http://aware.cirad.fr/layers/geonode%3Aclassif_gabir_2017_postclas_code3_cor (accessed 9.6.19).

Egli, M., Nater, M., Mirabella, A., Raimondi, S., Plötze, M., Alioth, L., 2008. Clay minerals, oxyhydroxide formation, element leaching and humus development in volcanic soils. Geoderma 143, 101–114. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.10.020

FAO, ITPS, 2018. Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Technical Report. Rome.

Feder, F., Bourgeon, G., 2009. Mise à jour de la carte des sols de l'île de la Réunion. EGS 16, 85–99.

Fujisaki, K., Chevallier, T., Chapuis-Lardy, L., Albrecht, A., Razafimbelo, T., Masse, D., Ndour, Y.B., Chotte, J.-L., 2018. Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis. Agriculture, Ecosystems & Environment 259, 147–158. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.008

Grim, R.E., 1968. Clay Mineralogy [WWW Document]. Infoscience. URL https://infoscience.epfl.ch/record/27086 (accessed 9.12.19).

Guo, L.B., Gifford, R.M., 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Global Change Biol 8, 345–360. https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x

Heil, J., Häring, V., Marschner, B., Stumpe, B., 2019. Advantages of fuzzy k-means over k-means clustering in the classification of diffuse reflectance soil spectra: A case study with West African soils. Geoderma 337, 11–21. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.004

Herbillon, A.J., Delvaux, B., 1990. Halloysites from tropical ash-derived soils as minerals at the border between high activity and low activity clays., in: Proc. IXth Inst. Soil Classification Workshop, Alma Ata, USSR, 11-19 Sept. 1988. Presented at the Proc. IXth Inst. Soil Classification Workshop,", USSR? Alma Ata (du 11/09/88 au 19/09/88), pp. 320–329.

Hidalgo, C., Etchevers, J.D., Martínez-Richa, A., Yee-Madeira, H., Calderon, H.A., Vera-Graziano, R., Matus, F., 2010. Mineralogical characterization of the fine fraction (<2µm) of degraded volcanic soils and tepetates in Mexico. Applied Clay Science, Fourth Mediterranean Clay Meeting 49, 348–358. https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.007

Houghton, R.A., 2013. The emissions of carbon from deforestation and degradation in the tropics: past trends and future potential. Carbon Management 4, 539–546. https://doi.org/10.4155/cmt.13.41

IPCC, 2019. Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.

IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 3: Consistent Representation of Lands. Authors: Kathryn Bickel (USA) and Gary Richards (Australia) Michael Köhl (Germany) and Ricardo Leonardo Vianna Rodrigues (Brazil) Contributing Author: Goran Stahl (Sweden). IPCC.

IUSS Working group WRB, 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.

Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B., Righi, D., Delvaux, B., 2005. Halloysite clay minerals – a review. Clay Minerals 40, 383–426. https://doi.org/10.1180/0009855054040180

Le, S., Josse, J., Husson, F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. Journal of Statistical Software, 25(1), 1-18. 10.18637/jss.v025.i01.

Legros, J.-P., 2007. Les grands sols du monde. PPUR, Lausanne.

Levard, C., Doelsch, E., Basile-Doelsch, I., Abidin, Z., Miche, H., Masion, A., Rose, J., Borschneck, D., Bottero, J.-Y., 2012. Structure and distribution of allophanes, imogolite and proto-imogolite in volcanic soils. Geoderma 183–184, 100–108. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.015

Liaw, A., Wiener, M., 2002. Classification and Regression by randomForest. R News 2(3), 18--22.

Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., Hornik, K., 2019. cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions. R package version 2.0.8.

Mizota, C., Reeuwijk, L.P. van, 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions.

Norrish, K., 1995. An unusual fibrous halloysite, in: Clays Control the Environment : Proceedings of the 10th International Clay Conference 1993. (G.J. Churchman, R.W. Fitzpatrick & R.A. Eggleton, editors), Adelaide, Australia., p. Pp. 275-284.

Parikh, S.J., Goyne, K.W., Margenot, A.J., Mukome, F.N.D., Calderón, F.J., 2014. Soil Chemical Insights Provided through Vibrational Spectroscopy, in: Advances in Agronomy. Elsevier, pp. 1–148. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800132-5.00001-8

Perret, S., 1992. Etude de propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. Facteurs naturels et anthropiques d'évolution des horizons culturaux, implications agronomiques et écologiques. ENSA Montpellier, Montpellier.

Poeplau, C., Don, A., 2013. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. Geoderma 192, 189–201. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.003

Pouzet, D., 2002. Caractérisation chimique des sols réunionnais. CIRAD.

Powers, J.S., Corre, M.D., Twine, T.E., Veldkamp, E., 2011. Geographic bias of field observations of soil carbon stocks with tropical land-use changes precludes spatial extrapolation. Proceedings of the National Academy of Sciences 108, 6318–6322. https://doi.org/10.1073/pnas.1016774108

QGIS Development Team, 2019. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation.

Quantin, P., Herbillon, A.J., Janot, C., Sieffermann, G., 1984. L'halloysite blanche riche en fer de Vate (Vanuatu) : Hypothèse d'un édifice interstratifié halloysite-hisengérite. Clay Minerals 16, 629–643.

R Core Team, 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

Raunet, M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. CIRAD.

Rodríguez Rodríguez, A., Arbelo, C.D., Guerra, J.A., Mora, J.L., Notario, J.S., Armas, C.M., 2006. Organic carbon stocks and soil erodibility in Canary Islands Andosols. CATENA 66, 228–235. https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.02.001

Sierra, J., Causeret, F., Diman, J.L., Publicol, M., Desfontaines, L., Cavalier, A., Chopin, P., 2015. Observed and predicted changes in soil carbon stocks under export and diversified agriculture in the Caribbean. The case study of Guadeloupe. Agriculture, Ecosystems & Environment 213, 252–264. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.08.015

Takahashi, M., Ishizuka, S., Ugawa, S., Sakai, Y., Sakai, H., Ono, K., Hashimoto, S., Matsuura, Y., Morisada, K., 2010. Carbon stock in litter, deadwood and soil in Japan's forest sector and its comparison with carbon stock in agricultural soils. Soil Science and Plant Nutrition 56, 19–30. https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00425.x

Terra, F.S., Demattê, J.A.M., Viscarra Rossel, R.A., 2018. Proximal spectral sensing in pedological assessments: vis–NIR spectra for soil classification based on weathering and pedogenesis. Geoderma 318, 123–136. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.053

Torn, M.S., Trumbore, S.E., Chadwick, O.A., Vitousek, P.M., Hendricks, D.M., 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. Nature 389, 170–173. https://doi.org/10.1038/38260

Tosser, V., Eglin, T., Bardy, M., Besson, A., 2014. Evaluation des stocks de carbone organique des sols cultivés de France. Application de la méthodologie Tier 1 du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) aux sites du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS). Etude et Gestion des Sols 21, p7-23.

Tsozué, D., Nghonda, J.P., Tematio, P., Basga, S.D., 2019. Changes in soil properties and soil organic carbon stocks along an elevation gradient at Mount Bambouto, Central Africa. CATENA 175, 251–262. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.028

Tsui, C.-C., Tsai, C.-C., Chen, Z.-S., 2013. Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan. Geoderma 209–210, 119–127. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.013

Zebrowski, C., 1975. Etude d'une climatoséquence dans l'île de la Réunion. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 13, 255–278.

Données supplémentaires « Stocks de COS »

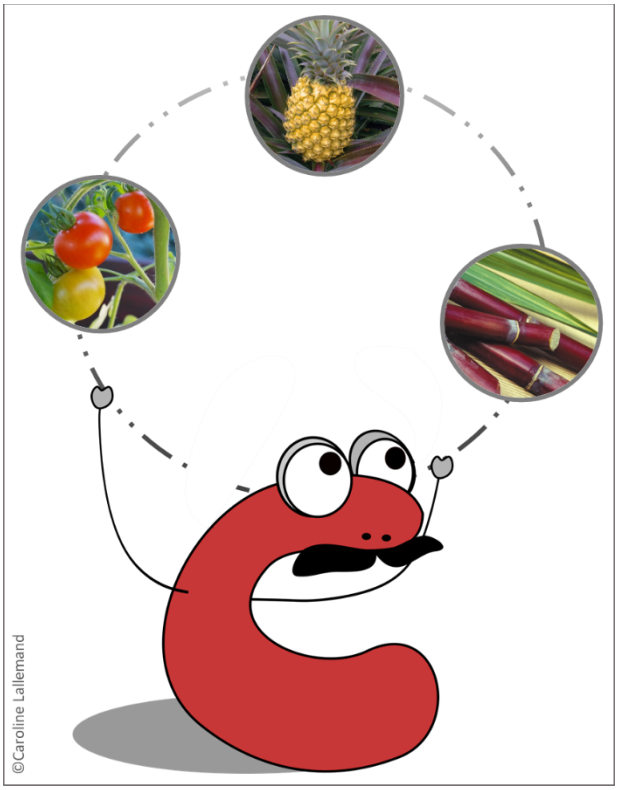
UPS_CLIMAT	Usage	Stock de COS moyen	Stock de COS écart-type	Effectif	Quantité de COS	Surface
		(MgC ha^{-1})	(MgC ha^{-1})		(MgC)	(ha)
1		**100**	**25**	**511**	**262707**	**2519**
1_TD	Canne	92.07	27.53	16	5637	61
1_TM	Ananas	93.01	29.3	15	6755	73
1_TM	Canne	105.72	30.42	423	158891	1503
1_TM	Maraichage	100.01	26.34	6	14524	145
1_TM	Prairie	101.19	10.06	4	25067	248
1_TM	Arboriculture	108.09	28.87	7	34748	321
1_TW	Canne	101.85	25.87	40	17086	168
2		**102**	**50**	**862**	**455386**	**3660**
2_TD	Ananas	64.98	14.24	4	472	7
2_TD	Canne	88.87	41.82	169	59225	666
2_TD	Maraichage	60.51	53.88	4	6697	111
2_TD	Arboriculture	78	30.52	5	26749	343
2_TM	Ananas	115.85	95.79	3	1100	10
2_TM	Canne	159	64.92	520	254616	1601
2_TM	Maraichage	106.25	67.39	3	5039	47
2_TM	Arboriculture	99.42	56.41	3	20367	205
2_TW	Ananas	97.57	14.85	5	454	5
2_TW	Canne	118.54	51.89	141	66951	565
2_TW	Arboriculture	137.3	56.03	5	13717	100
3		**230**	**70**	**1826**	**4236520**	**17125**
3_TD	Canne	175.72	78.71	27	15706	89
3_TD	Prairie	253.33	97.98	4	46341	183
3_TD	Arboriculture	170.97	81.15	6	22390	131
3_TM	Canne	194.12	57.82	380	254204	1310
3_TM	Maraichage	221.47	57.64	54	160373	724
3_TM	Prairie	300.74	53.03	14	870831	2896
3_TM	Arboriculture	219.78	80.72	35	362668	1650
3_TW	Ananas	197.97	60.7	67	19587	99
3_TW	Canne	223.32	66.61	1157	1062148	4756
3_TW	Maraichage	218.82	112.52	8	18705	85
3_TW	Arboriculture	238.71	90.18	32	331102	1387
3_WTM	Canne	223.93	45.35	14	13312	59
3_WTM	Maraichage	268.14	31.33	7	54037	202
3_WTM	Prairie	292.16	67.27	12	814139	2787
3_WTM	Arboriculture	248.88	74.87	9	190978	767
4		**137**	**37**	**597**	**331323**	**2605**
4_TD	Canne	166.17	33.51	66	22038	133
4_TD	Maraichage	172.21	37.04	8	3338	19
4_TM	Ananas	108.66	34.21	7	1736	16
4_TM	Canne	118.42	41.19	415	145265	1227
4_TM	Maraichage	123.75	35.28	11	18022	146

4_TM	Arboriculture	113.52	43.78	32	67118	591
4_TW	Canne	159.61	46.07	54	65390	410
4_TW	Arboriculture	131.26	22.9	4	8416	64
5		**146**	**43**	**983**	**805528**	**5151**
5_TD	Canne	151.58	34.56	27	16061	106
5_TM	Ananas	113.33	46.59	11	3431	30
5_TM	Canne	149	46.25	562	245975	1651
5_TM	Maraichage	161.13	31.81	24	48106	299
5_TM	Prairie	192.93	51.4	4	135208	701
5_TM	Arboriculture	156.68	36.06	33	153542	980
5_TW	Ananas	102.57	37.87	18	876	9
5_TW	Canne	149.24	53.15	299	156384	1048
5_TW	Arboriculture	139.98	52.62	5	45946	328
6		**100**	**28**	**498**	**212252**	**2103**
6_TD	Canne	93.18	24.03	19	6409	69
6_TM	Ananas	97.59	23.96	14	3540	36
6_TM	Canne	100.24	25.98	420	153514	1531
6_TM	Maraichage	97.07	19.4	5	7250	75
6_TM	Arboriculture	106.34	40.27	7	20374	192
6_TW	Canne	105.78	33.88	33	21164	200
7		**90**	**33**	**2388**	**898436**	**10194**
7_TD	Ananas	71.26	18.84	28	5970	84
7_TD	Canne	83.31	26.76	1302	263778	3166
7_TD	Maraichage	67.93	21.16	46	38825	572
7_TD	Prairie	136.32	93.47	5	44878	329
7_TD	Arboriculture	92.59	45.29	27	143399	1549
7_TM	Ananas	79.98	27.69	32	5000	63
7_TM	Canne	90.12	26.73	909	288799	3205
7_TM	Maraichage	84.04	16.72	4	20868	248
7_TM	Prairie	97.3	33.81	3	21152	217
7_TM	Arboriculture	84.45	20.34	6	57755	684
7_TW	Canne	103.38	27.94	26	8010	77
8		**123**	**37**	**583**	**238166**	**1944**
8_TD	Ananas	110.69	53.84	3	1088	10
8_TD	Canne	118.81	34.14	364	121768	1025
8_TD	Maraichage	148.46	35.36	11	13442	91
8_TD	Arboriculture	139.25	46.96	4	37916	272
8_TM	Ananas	124.43	27.53	3	507	4
8_TM	Canne	120.21	39.88	190	54289	452
8_TM	Arboriculture	101.16	23.32	8	9155	91
9		**86**	**51**	**251**	**113765**	**1235**
9_TD	Ananas	76.41	28.68	7	1976	26
9_TD	Canne	85.8	32.47	225	50869	593
9_TD	Maraichage	77.93	47.27	8	10227	131
9_TD	Arboriculture	104.47	96.74	11	50693	485

Données supplémentaires « Différences de stocks de COS »

UPC	Usage	Stock de COS moyen	Stock de COS moyen	Stock de COS écart-type	Stock de COS écart-type	Δstock de COS moyen	Δstock de COS écart-type	Nb d'échantillons	p-value	% de variation
		(MgC ha-1)	(MgC ha-1)	(MgC ha-1)	(MgC ha-1)	(MgC ha-1)	(MgC ha-1)			
		Autre usage	Canne à sucre	Autre usage	Canne à sucre			Autre usage		
3_TW	Ananas	206	245	56	21	-39	54	60	5.86E-07	-16
7_TD	Maraichage	69	82	18	7	-13	21	44	1.96E-04	-15
6_TM	Ananas	96	110	16	13	-14	13	16	4.27E-04	-13
5_TM	Maraichage	152	178	37	28	-27	30	20	9.08E-04	-15
9_TD	Maraichage	56	99	24	18	-43	12	5	1.43E-03	-44
3_TM	Maraichage	209	251	39	63	-43	59	20	4.43E-03	-17
4_TW	Maraichage	147	179	12	11	-32	1	2	8.78E-03	-18
5_TW	Ananas	109	142	45	43	-33	49	18	1.02E-02	-23
7_TM	Ananas	76	87	24	8	-11	23	31	1.54E-02	-12
4_TD	Ananas	138	168	1	2	-30	1	2	1.67E-02	-18
3_TM	Prairie	292	227	51	26	64	27	4	1.76E-02	28
7_TD	Ananas	72	81	18	10	-9	20	28	2.47E-02	-11
6_TM	Maraichage	84	108	9	1	-23	9	3	4.31E-02	-22
2_TW	Ananas	89	113	11	9	-24	10	3	5.20E-02	-22
8_TD	Maraichage	93	110	30	32	-17	12	4	6.68E-02	-16
8_TM	Arboriculture	101	121	23	17	-20	29	8	8.96E-02	-17
1_TM	Ananas	94	108	38	14	-14	35	19	9.65E-02	-13
3_TM	Arboriculture	201	223	51	49	-22	58	19	1.23E-01	-10
7_TD	Prairie	68	81	9	12	-13	4	2	1.29E-01	-16
4_TW	Arboriculture	131	158	23	16	-27	26	4	1.31E-01	-17
7_TM	Maraichage	96	83	22	9	13	17	6	1.35E-01	15
2_TD	Arboriculture	100	134	42	55	-34	13	2	1.67E-01	-26
5_TM	Ananas	140	162	30	13	-22	33	5	2.09E-01	-14
3_TM	Ananas	196	244	12	18	-48	30	2	2.65E-01	-20
6_TW	Ananas	106	100	2	2	6	4	2	2.78E-01	6
3_TW	Arboriculture	247	230	88	29	17	86	29	3.03E-01	7
9_TD	Arboriculture	77	106	32	20	-29	51	4	3.38E-01	-27
4_TM	Ananas	129	137	30	28	-9	23	7	3.59E-01	-6
2_TM	Arboriculture	99	87	56	40	13	19	3	3.66E-01	15
1_TW	Ananas	92	107	11	3	-15	13	2	3.68E-01	-14
2_TD	Maraichage	61	86	54	3	-26	52	4	3.96E-01	-30
1_TM	Maraichage	95	104	40	16	-10	33	8	4.19E-01	-10
2_TM	Ananas	116	136	96	61	-20	36	3	4.34E-01	-15
2_TM	Maraichage	106	90	67	84	17	30	3	4.37E-01	18
8_TM	Maraichage	109	131	43	23	-23	51	4	4.38E-01	-17
3_TW	Maraichage	197	222	81	16	-25	78	6	4.63E-01	-11
8_TD	Prairie	160	108	108	1	52	107	3	4.84E-01	49
8_TD	Arboriculture	137	119	75	18	18	60	6	4.88E-01	15
4_TD	Maraichage	184	174	30	2	9	31	6	4.97E-01	5
5_TM	Arboriculture	153	160	33	28	-7	47	22	5.11E-01	-4
8_TD	Ananas	102	81	66	22	20	44	3	5.13E-01	25
2_TD	Ananas	72	77	5	9	-5	10	3	5.14E-01	-6
5_TW	Maraichage	160	122	94	35	38	60	2	5.33E-01	31
7_TM	Arboriculture	82	87	20	3	-5	19	6	5.51E-01	-6
1_TM	Arboriculture	108	102	36	19	6	31	11	5.57E-01	6
4_TM	Arboriculture	117	121	40	20	-4	37	28	5.60E-01	-3
6_TM	Arboriculture	103	110	27	7	-7	25	5	5.70E-01	-6
5_TW	Arboriculture	133	125	45	32	7	34	7	5.82E-01	6
4_TW	Ananas	138	114	59	41	24	93	5	5.89E-01	21
2_TW	Arboriculture	119	125	28	6	-5	22	3	7.15E-01	-4
7_TD	Arboriculture	75	76	21	9	-1	23	24	7.72E-01	-2
9_TD	Ananas	82	84	26	11	-1	27	6	9.05E-01	-2
4_TD	Arboriculture	152	149	51	12	4	61	3	9.26E-01	2
4_TM	Maraichage	134	134	38	41	0	30	7	9.83E-01	0

CHAPITRE 5



CHAPITRE 5. BILANS GAZ A EFFET DE SERRE (GES), CHANGEMENTS D'USAGES AGRICOLES ET TERRITOIRE HETEROGENE : UNE APPROCHE SPATIALE

Le Chapitre 5 a pour objectif d'évaluer les variations de stocks de carbone organique du sol (COS) entre usages agricoles selon une approche spatiale, c'est-à-dire dans des unités spatiales homogènes où les conditions pédoclimatiques sont identiques, afin de prendre en compte l'hétérogénéité du territoire. Les stocks de COS ainsi évalués sont appliqués comme facteur d'émission Tier 2 dans le calculateur EX-ACT (FAO) pour le calcul du bilan de Gaz à Effet de Serre (GES) de différents scénarios de changements d'usage des terres agricoles à l'échelle territoriale. Ce chapitre se présente sous la forme d'un article intitulé « Bilans gaz à effet de serre (GES), changements d'usages agricoles et territoire hétérogène : une approche spatiale ».

Auteurs :

Myriam Allo[1,2], Pierre Todoroff[1], Kenji Fujisaki[3], Tiphaine Chevallier[3], Alain Albrecht[3]

[1] CIRAD, UPR AIDA, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France. AIDA, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France. pierre.todoroff@cirad.fr

[2] ADEME, Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésillé,BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

[3] UMR Eco&Sols, IRD, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France. alain.albrecht@ird.fr

Auteur correspondant : Myriam Allo (myriam.allo@cirad.fr)

CIRAD, UPR AIDA, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France. AIDA, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

ADEME, Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésillé, BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

Résumé :

L'évaluation des variations des stocks de carbone organique du sol dues aux changements d'usages des terres en milieu tropical est un enjeu méthodologique important. Bien que les inventaires nationaux des émissions de GES, fournis par les Parties dans le cadre de l'Accord de Paris et des Contributions Déterminées au Niveau national (CDN), suivent les lignes directrices de l'IPCC, l'utilisation de facteurs d'émission simplifiés à l'échelle de grandes régions (Tier 1) entraine des incertitudes élevées. L'objectif de cette étude est de préciser les facteurs d'émissions par une évaluation des variations de stocks de carbone organique du sol (COS) selon les usages agricoles sur des unités spatiales homogènes où les conditions pédoclimatiques sont identiques afin de définir des facteurs d'émissions Tier 2. Ces facteurs d'émissions sont ensuite utilisés dans le calculateur EX-ACT (FAO) pour le calcul du bilan de GES de 4 scénarios de changements d'usage des terres agricoles à l'échelle du territoire de La Réunion, dont la diversité pédologique et climatique recoupe une grande part de celle des régions tropicales. Cette méthodologie doit permettre d'évaluer plus précisément les émissions de CO_2 du compartiment sol dans le cadre de scénarios de changements d'usage des terres agricoles. Dans les 10 unités pédoclimatiques pour lesquelles une différence significative de stock de COS entre la canne à sucre et un autre usage, au moins, a pu être observée, l'analyse des bilans GES des 4 scénarios de changement d'usage des terres agricoles considérés a effectivement montré le rôle important du compartiment sol dans les bilans GES. D'autre part, une comparaison de ces bilans GES a été réalisée entre une approche spatiale (par unité pédoclimatique) et une approche générale simplificatrice (habituellement utilisé pour ce type de calculateur) où le territoire est considéré comme une seule et unique entité, définie par un seul type de sol et de climat. Les résultats des bilans de GES ont montré qu'une approche spatiale est indispensable pour évaluer les variations de stocks de carbone organique du sol selon les changements d'usages agricoles afin de ne pas modifier l'ampleur et/ou le sens des émissions de GES, notamment pour le compartiment sol. La mise en place de systèmes MRV fiables nécessitent donc, a minima, des facteurs d'émissions Tier 2 adaptés au territoire étudié et à l'hétérogénéité spatiale des stocks de COS et de leurs déterminants.

Mots-clés : Bilan GES ; stock de carbone organique du sol ; facteur d'émission Tier 2 ; calculateur EX-ACT ; changements d'usages agricoles ; territoire hétérogène.

5.1 Introduction

Le récent rapport du GIEC estime que les émissions de GES (Gaz à Effet de Serre) du secteur de l'agriculture, de la foresterie, et autres affectations des terres (AFAT) représente 12 ± 3 $GtCO_2eq\ an^{-1}$, soit 23% des émissions totales sur la période 2007-2016 (IPCC, 2019). Les émissions de GES dues aux changements d'usages des terres sont quant à elles estimées annuellement à de 5.2 ± 2.6 $GtCO_2eq\ an^{-1}$, soit près de 10 % des émissions annuelles totales de GES, évaluées sur la période 2007 -2016 (IPCC, 2019). Les changements d'usages des terres peuvent donc avoir des changements significatifs sur les réservoirs de carbone, notamment du réservoir sol qui contient entre 1500 -2400 GtC (5500 – 8800 $GtCO_2$)(Batjes, 1996), et entrainer des émissions de CO_2 ou un stockage de carbone à grande échelle. De plus, la quasi-totalité de ces émissions de GES est due aux changements d'usages des terres (principalement déforestation) sous les tropiques, les sols tropicaux stockant par ailleurs 31 % du carbone du sol total, et les zones subtropicales 15% (FAO and ITPS, 2018).

Dans le cadre de l'Accord de Paris et des Contributions Déterminées au Niveau national (NDC en anglais), les Parties (Etats) doivent fournir des inventaires nationaux des émissions de GES dues aux activités anthropiques. Or pour le secteur agricole, ces inventaires restent le principal outil des politiques d'atténuation du changement climatique (Smith et al., 2019). Afin d'établir de tels inventaires, les méthodologies développées par le GIEC sont utilisées selon différents niveaux de précision (Tier) : de l'approche Tier 1, correspondant à une approche très générale avec des facteurs d'émissions moyens fournis pour les grandes régions du monde définies par le GIEC, à l'approche Tier 2 dont les facteurs d'émissions sont adaptés à l'échelle des pays voire des régions, et jusqu'à l'approche Tier 3, plus détaillée et incluant la modélisation biophysique des phénomènes à l'origine des émissions de GES (Bernoux et al., 2016).

Pour le secteur agricole, la bonne prise en compte des émissions du sol est primordiale, les émissions de N_2O et de CH_4 des sols atteignant respectivement 82 % et 44 % des émissions de GES du secteur agricole à l'échelle mondiale (IPCC, 2019). D'un point de vue méthodologique, l'évaluation des émissions de CO_2 énergétiques, de N_2O et de CH_4, selon les approches génériques du GIEC (Tier 1 et Tier 2) sont basées sur la multiplication d'une donnée d'activité par un facteur d'émission spécifique pour un gaz et une source donnés. Pour les sources et les puits de CO_2 non énergétiques, le GIEC préconise une approche par bilan de masse c'est-à-dire une évaluation de la variation des stocks de carbone au cours du temps dans cinq compartiments : biomasse aérienne, biomasse souterraine, litière, bois mort et sol (Colomb et al., 2013b). Or, l'évaluation des variations des stocks de carbone organique du sol dues aux changements d'usages des terres agricoles selon une approche Tier 1, telle qu'utilisée par de nombreux pays en développement, peuvent induire des incertitudes élevées (Milne et al., 2013; Smith et al., 2019). En effet, le sens et l'ampleur des effets des changements d'usages sur les stocks de carbone des sols tropicaux restent mal connus, notamment parce que les facteurs biophysiques affectant le stockage du carbone organique du sol ne sont pas pris en compte dans les méthodes d'estimation actuelles, empêchant ainsi l'extrapolation à des régions présentant des conditions biophysiques différentes (Powers et al., 2011). Ainsi, dans leur méta-analyse des études des variations de stocks de carbone du sol dues à des changements d'usage du sols sous les tropiques, Powers et al. (2011) recommandent une extrême prudence quant à la généralisation des variations moyennes de ces stocks, étant donné que les déterminants biophysiques tels que la pluie moyenne annuelle et la composition minéralogique des argiles impactent fortement les effets des changements d'usage du sol sur le stock de carbone. Colomb et al. (2012) précisent également que pour répondre aux enjeux de l'évaluation des émissions de GES à l'échelle territoriale, des facteurs d'émissions spécifiques doivent être établis pour l'ensemble des conditions pédoclimatiques et des processus biologiques.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les variations de stocks de carbone organique du sol (COS) entre usages agricoles dans des unités spatiales homogènes, c'est-à-dire où les conditions pédoclimatiques sont identiques. Les stocks de COS ainsi évalués sont utilisés comme facteur d'émission Tier 2 pour le calcul du bilan de GES de scénarios de changements d'usage des terres agricoles à l'échelle territoriale.

Ce travail a été réalisé sur l'île tropicale volcanique de La Réunion comme cas d'étude, un petit territoire de l'outremer français, dont la diversité pédologique et climatique recoupe une grande part de celle des régions tropicales, avec une très grande variété de sols (Ferralsols, Cambisols, Andosols) et différentes régions climatiques IPCC (Tropical Wet, Tropical Moist, Tropical Dry et Warm Temperate Moist). La Réunion, de par son relief accidenté, présente effectivement un gradient d'altération des roches et des cendres volcaniques de haut en bas de la topo-séquence, doublé d'un fort gradient climatique à la fois le long de la topo-séquence mais également entre la côte au vent très humide et la côte sous le vent sèche à semi-aride. La Réunion est donc un territoire spatialement hétérogène, à la fois d'un point de vue pédologique et climatique. Des unités pédoclimatiques (UPC) homogènes vis-à-vis des stocks de COS ont été définies (cf. section 4.2) afin d'évaluer les variations de stocks de COS entre usages agricoles pour chaque unité pédoclimatique et établir ainsi des facteurs d'émissions Tier 2. Les principaux changements observés et attendus ces prochaines décennies dans le secteur agricole à La Réunion sont des conversions des surfaces actuellement en canne à sucre vers des surfaces cultivées selon d'autres usages agricoles (ananas, maraîchage, arboriculture, prairie). Par conséquent, la canne à sucre, cultivée depuis plus de 200 ans à La Réunion et occupant encore plus de 50% de la surface agricole de l'île, est considérée comme la référence pour le calcul des variations de stocks de COS. De plus, le stock de carbone du sol sous canne à sucre est considéré à l'équilibre pour une unité pédoclimatique donnée (cf. section 4.1). Ces changements d'usages des terres agricoles pouvant potentiellement être sources ou puits de GES, notamment de dioxyde de carbone (CO_2) issus des compartiments sol et biomasse, cette étude a pour objectif d'évaluer les émissions de GES, positives ou négatives, suite à ces changements d'usages à l'aide d'un calculateur de bilan de GES. Le calculateur EX-ACT, conçu pour évaluer un projet et comparer la situation en absence et présence de projet, notamment concernant les émissions de carbone du sol et de la biomasse lors de changements d'usages des sols (Colomb et al., 2013) est apparu le plus adapté pour cette étude. De plus, il permet également de tenir compte de la diversité pédologique, climatique et agronomique du territoire de La Réunion en définissant la zone d'étude en fonction du type de sol et du climat, représentant chaque unité pédoclimatique issue de la stratification du territoire. Sa structure simple permet donc à un utilisateur « expert » de s'appuyer sur des facteurs d'émissions de type Tier 2 bien que la contrepartie soit un travail important de collecte de données en amont (Colomb et al., 2013a).

Cette étude se fonde sur le résultat de la stratification du territoire que sont les unités pédoclimatiques pour (1) l'évaluation des variations de stocks de COS du sol dues aux changements d'usage des terres agricoles et (2) l'estimation des émissions de GES suite à des scénarios de changements d'usages des terres agricoles à l'échelle territoriale.

5.2 Matériel & Méthodes

5.2.1 Site d'étude et données

La Réunion, département d'outre-mer, est une île volcanique tropicale située à environ 21° de latitude sud et 55° de longitude est, située à 700 km à l'Est de Madagascar dans l'Océan Indien (Figure 5.1a).

D'une superficie de 2 500 km², l'île est la partie émergée d'un édifice de 7 000 m de hauteur et se compose de deux volcans, le Piton des Neiges (3069 m d'altitude), stratovolcan daté de 2 Ma et le Piton de La Fournaise (2632 m), un volcan effusif né il y a 500 000 ans et classé parmi les volcans les plus actifs au monde. Le Piton des Neiges, fortement marqué par l'érosion avec ses trois grandes excavations appelés cirques, constitue les deux tiers de l'île tandis que le massif du Piton de La Fournaise, plus récent présente une activité effusive principalement au sein de sa caldeira au Sud-Est de l'île. Les surfaces agricoles sont majoritairement localisées dans les bas de versants et dans les plaines d'altitude entre les deux volcans. Une carte d'occupation du sol 2017 produite par le CIRAD à partir d'images satellites à très haute résolution spatiale Spot6/7 a permis d'identifier les surfaces agricoles selon les grands types d'usage définis pour les besoins de cette étude (Figure 5.1c) et qui se répartissent comme suit : canne à sucre (51% de la surface agricole), l'arboriculture (22%), la prairie (16%), le maraîchage (7%) et l'ananas (1%) (Dupuy, 2018). Parmi la base d'analyse chimique de sol du CIRAD à La Réunion, 8742 échantillons de sol géoréférencés (profondeur 0-30 cm), analysés depuis 1993 et provenant de parcelles agricoles sous différents usages (ananas, arboriculture, canne à sucre, maraîchage, prairie) réparties sur l'ensemble des surfaces cultivées de La Réunion ont été sélectionnés (cf. Chapitre 2) (Figure 5.1b). Ces données, couplées à une classification non supervisée de leurs spectres en moyen infra-rouge et un algorithme de Random Forest ont permis de définir des unités pédologiques sur la zone cultivée de l'île. Ces unités pédologiques ont ensuite été intersectées avec des unités climatiques (IPCC) afin de découper le territoire agricole réunionnais en unités pédoclimatiques (cf. section 4.2) (Figure 5.1d).

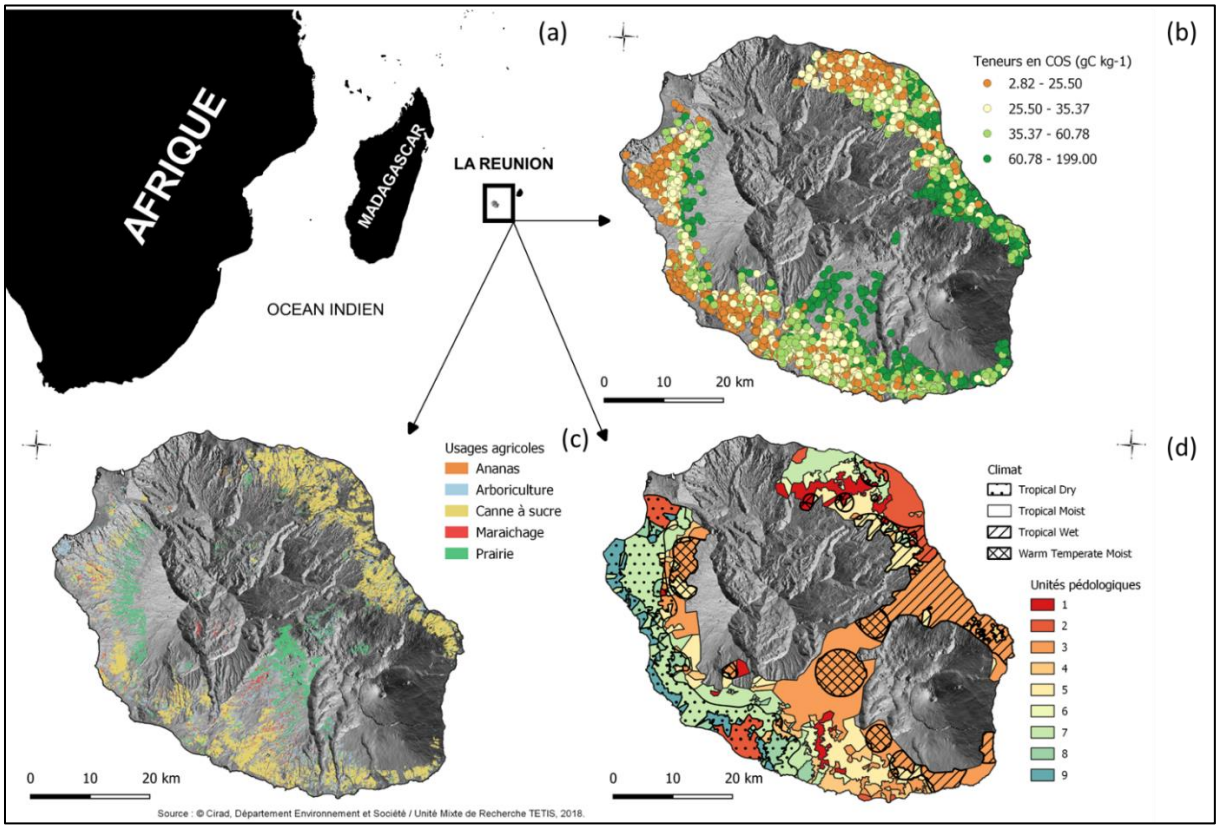


FIGURE 5.1 : LOCALISATION DE LA REUNION (A) ET CARTOGRAPHIE DES TENEURS EN CARBONE DES ECHANTILLONS DE LA BASE DE DONNEES (B), DES SOLS AGRICOLES (C), ET DES UNITES PEDOCLIMATIQUES (D) DE LA REUNION, UTILISES DANS CETTE ETUDE

5.2.2 Principe du calculateur EX-ACT

EX-ACT (pour *Ex Ante* Carbon-balance Tool) est un outil développé par la FAO (Bernoux et al., 2016), permettant d'estimer le bilan carbone de projets agricoles et/ou forestiers. Cet outil se présente sous la forme d'un classeur Microsoft Excel, incluant différents onglets (les « modules ») correspondant à différents postes d'émissions ou de puits de gaz à effet de serre (GES) lors de la mise en place d'un projet : changements d'usage des terres, changement de modes de gestion au sein des cultures annuelles, gestion des prairies, dégradation des terres, gestion des zones humides côtières, consommation d'intrants et d'énergie, pêcheries et aquaculture. Les émissions de GES des différents modules sont établies à l'aide de facteurs d'émissions et de valeurs par défaut présents dans les rapports du GIEC, et contenus dans les formules de calcul. Les émissions de GES et le bilan net du projet sont exprimés en tCO_2eq. Pour obtenir un bilan GES d'un projet, l'utilisateur doit renseigner (i) des informations générales sur le projet (aire géographique, caractéristiques du sol et du climat, durée du projet), (ii) des projections de changements d'utilisation des terres ou de technologies dans chaque module concerné par le projet ; et (iii) éventuellement des facteurs d'émission spécifiques à la région d'étude si ces valeurs sont disponibles.

Dans le cas de La Réunion, les changements d'usage attendus impliquent l'utilisation de deux modules au sein de l'outil EX-ACT afin d'obtenir le bilan carbone lié à ces changements d'usage : le module changement d'usage des terres, et le module consommation d'intrants. En effet, les changements d'usage des terres peuvent entrainer des différences de consommation d'intrants, se traduisant par des changements potentiels d'émissions de GES. L'outil EX-ACT calcule le bilan GES d'un projet dont l'emprise géographique concernée présente des caractéristiques biophysiques spatialement homogènes (en particulier un même type de sol et un même climat). Etant donné la très grande variabilité climatique et pédologique à La Réunion, il était nécessaire de découper le territoire en zones homogènes vis-à-vis du COS. Nous avons ainsi utilisé les unités pédoclimatiques définies dans la section 4.2 et avons défini pour chacune d'elles des facteurs d'émissions Tier 2 avant de décliner sur leur emprise des scénarios de changement d'usage des terres agricoles. Le bilan des scénarios est obtenu à l'échelle du territoire par agrégation des bilans de chacune des unités pédoclimatiques.

Les résultats des émissions de GES d'un territoire, suite à un projet d'une durée de 20 ans dans cette étude (5 ans de phase d'implantation et 15 ans de phase de capitalisation), sont présentés en tCO_2eq pour la durée totale du projet et par année. Le bilan des émissions de GES est la différence entre les émissions de GES sans projet et avec projet. Ce bilan est décomposé par postes d'émission de GES appelés « composantes », au nombre de trois dans cette étude : « Autres CUT » (pour les changements d'usages agricoles sauf culture pérenne), « Pérenne » (arboriculture dans cette étude), « Intrants & Investissements » (engrais et pesticides). Le bilan de GES est également décomposé par gaz à effet de serre et son compartiment d'origine : CO_2-Biomasse, CO_2-Sol, CO_2-Autre (émissions de CO_2 dues au chaulage et à l'application d'Urée) et N_2O. Le bilan des émissions de CH_4 est systématiquement nul et non présenté dans les résultats car les effectifs animaux sont constants dans les scénarios proposés.

5.2.3 Deux approches du territoire

Deux types d'approches du territoire sont proposées et confrontées pour le calcul du bilan GES avec le calculateur EX-ACT : une approche par unité pédoclimatique (notée 'Spatiale') où le bilan est réalisé pour chaque unité pédoclimatique puis sommés afin d'estimer le bilan GES de toutes les unités pédoclimatiques considérées ; et une approche plus générale du territoire où les unités pédoclimatiques sont considérées comme un ensemble homogène. Dans le cadre de l'approche

générale, deux méthodes sont proposées avec un paramétrage différent des stocks de COS : une méthode notée 'ΣUPC' et une méthode 'Globale'.

5.2.4 Collecte de données pour le calculateur EX-ACT

Par défaut, le bilan GES réalisé par EX-ACT ne concerne que les surfaces concernées par les changements d'usage prévus ; le calculateur applique un coefficient de changement de stock de carbone (C) du sol et de biomasse (un facteur d'impact) à ces changements de surface, permettant d'obtenir un bilan carbone du changement d'usage. Les facteurs d'émission Tier 1 utilisés par défaut, proviennent de rapports du GIEC (Bernoux et al., 2016), et diffèrent selon le type de changement d'usage (par exemple forêt vers prairie, cultures annuelles vers forêts plantées, etc.), et le climat. Utiliser les facteurs Tier 1 comporte plusieurs inconvénients dans notre cas, comme (i) les types de changements d'usages renseignés par défaut dans EX-ACT n'intègrent pas les changements attendus à la Réunion, comme les transitions canne vers ananas ou maraîchage, et (ii) les facteurs d'émission Tier 1 ont une incertitude très élevée, notamment en milieu tropical. Nous avons ainsi cherché à produire des facteurs d'émission des changements d'usage des sols spécifiques à la Réunion. Ces facteurs d'émission, dits de type Tier 2 (facteurs d'impacts régionaux) ont été déterminés au sein de chaque unité pédoclimatique homogène, grâce notamment aux données contenues dans les analyses de sols. Pour utiliser le calculateur EX-ACT, chaque unité pédoclimatique doit être définie selon les classes de sol de l'IPCC, nous avons donc établi une correspondance entre les unités pédologiques et les classes de sol de l'IPCC (2006) (VOL : volcanic soil ; HAC : high activity clay et LAC : low activity clay). Les données nécessaires à l'utilisation d'EX-ACT au sein d'une unité pédoclimatique homogène et les facteurs d'émissions Tier 2 renseignés dans le cadre de notre étude sont détaillées dans le Tableau 5.1 (cf. Données supplémentaires « Paramétrage EX-ACT »).

TABLEAU 5.1 : DONNEES ET FACTEURS D'EMISSIONS TIER 2 RENSEIGNES DANS LE CALCULATEUR EX-ACT POUR CETTE ETUDE

Modules EX-ACT	Données renseignées par unité pédoclimatique	Facteur d'émissions Tier 2 renseignés
Description	Classe de sol IPCC ; Climat IPCC	
Landuse change	Surfaces affectées par le changement d'usage	Stocks de COS par usage et par unité pédoclimatique ; Biomasse aérienne et racinaire par usage
Crop production	Surfaces par usage et surfaces en canne à sucre de chaque usine sucrière	
Grassland Livestock	Surfaces prairies par usage ; Effectifs animaux	Facteur d'émission de méthane (CH_4) liée à la fermentation entérique et aux déjections ; facteur d'émission de protoxyde d'azote (N_2O) liée au fumier
Inputs Investments	Apports en engrais (N, P_2O_5, K_2O), en urée, en compost ; Chaulage ; Pesticides (herbicides, insecticides, fongicides) par usage	

5.2.5 Flux de carbone du sol

Afin d'évaluer plus précisément les émissions de CO_2 du compartiment sol liées aux changements d'usage des terres, les stocks de COS par usage pour chaque unité pédoclimatique, ont été estimés à partir des mesures de la base d'analyses de sol pour ensuite être renseignés en facteurs d'émissions de niveau Tier 2 dans le calculateur EX-ACT. Les différences de stocks de COS (Δstocks) pour l'horizon

0-30 cm par unité pédoclimatique entre les usages agricoles et la canne à sucre ont été calculés selon la méthode développée dans la section 4.2.

En effet, la variabilité des stocks de COS étant encore très élevée malgré le découpage du territoire en unités pédoclimatiques homogènes vis-à-vis du carbone, et le nombre réduit d'échantillons des autres usages, les variations de stocks de carbone entre usages agricoles dans chaque unité pédoclimatique ont été déterminés en sélectionnant par requête spatiale des couples d'échantillons (canne et autre usage) géographiquement proches l'un de l'autre (« les voisins »). L'objectif est d'identifier le plus finement possible l'effet 'mode d'usage' pour une unité pédoclimatique donnée sur les stocks de carbone organique du sol. La méthode proposée consiste à comparer au sein d'une unité pédoclimatique donnée dans un rayon de 1 km (dénommé 'buffer') autour d'un échantillon d'usage autre que la canne à sucre (ananas, maraichage, prairie, arboriculture), le stock de COS de la canne à sucre (ou stock de COS moyen si plusieurs échantillons de sols sous canne à sucre sont présents à l'intérieur des buffers), avec le stock de COS d'un usage autre. La différence de stock de COS (Δstock = Stock COS sous un autre usage - Stock COS sous canne à sucre) a été calculé dans un rayon de 1 km autour des points d'usages autres (« buffer ») que la canne à sucre au sein d'une unité pédoclimatique. Les différences de stocks pour chaque couple d'usage dans une même unité pédoclimatique sont ensuite calculées à partir de la moyenne (± écart-type) des différences de stocks dans chaque buffer de cet usage au sein de l'unité pédoclimatique (cf. Données supplémentaires « Différences de stocks de COS »). Un test de Student permet de tester si cette différence est significative. Les tests statistiques ont été réalisés avec le logiciel R (R Core Team, 2019).

Les unités pédoclimatiques retenues pour l'évaluation des bilans GES à l'aide du calculateur EX-ACT sont celles qui présentent, au moins, une différence de stock significativement non nulle, indiquant ainsi une différence significative entre les stocks de carbone organique du sol sous les autres modes d'usage et celui sous canne à sucre. Les stocks de COS ainsi renseignés sont basés sur l'hypothèse que les différences de stocks de COS sont identiques sur l'ensemble de l'unité pédoclimatique. Le nombre d'échantillons de sol sous canne à sucre étant très important pour chaque unité pédoclimatique, le stock moyen sous canne à sucre a été renseigné pour chaque unité pédoclimatique, tandis que le stock de COS sous les autres usages a été calculé selon la différence de stock par rapport au stock sous canne à sucre. Pour les modes d'usages dont le stock de COS n'est pas significativement différent de celui sous canne à sucre, c'est le stock de COS sous canne à sucre de l'unité pédoclimatique qui est utilisé. Lorsque l'approche du territoire n'est plus « spatiale » mais « générale », le stock de COS par usage a été calculé à partir de la moyenne des stocks de COS des échantillons présents dans les buffers utilisés (méthode '∑UPC') ou bien à partir de la moyenne des stocks de COS de tous les échantillons de l'unité pédoclimatique (méthode 'Globale').

5.2.6 Scénarios de changements d'usages des terres

Nous avons défini 4 scénarios de changement d'usage des terres plausibles (augmentation des surfaces maraichères ou d'ananas) ou extrêmes (disparition d'une des deux sucreries de canne à sucre de l'île ou transformation de l'ensemble de la surface agricole en culture de canne à sucre) afin d'illustrer le fonctionnement du calculateur et d'évaluer le type d'impact (positif, négatif, neutre) en termes de GES des scénarios de changements d'usages agricoles.

Le scénario 'Ana' simule un doublement des surfaces en ananas au détriment des surfaces cultivées en canne à sucre. En effet, la diversification de la canne à sucre vers la culture de l'ananas est un changement d'usage observé depuis plusieurs années à La Réunion. Le scénario 'Mar' modélise une augmentation des surfaces cultivées en maraîchage afin d'atteindre l'autosuffisance en produits

maraîchers dans les 20 années à venir, soit à l'horizon 2040 ; l'augmentation des surfaces cultivées en maraîchage se faisant au détriment de celles cultivées en canne à sucre. En supposant que les fruits et légumes locaux approvisionnent 70 % du marché du frais, un changement de 5 % des surfaces cannières en surfaces maraichères devrait permettre d'atteindre l'objectif d'approvisionnement de 100 % du marché du frais. Le scénario 'Gol' simule la conversion des surfaces de canne à sucre en autres usages des terres, dans l'Ouest et le Sud de l'île, en raison de la fermeture de l'usine sucrière du Gol. Les surfaces précédemment en canne sont transformées en 25 % de prairie, 25 % de maraîchage, 25 % d'ananas et 25 % d'arboriculture. Enfin, le dernier scénario 'tt-canne' modélise un système cannier en monoculture à La Réunion ; toutes les surfaces sont donc transformées en canne à sucre, excepté l'unité pédoclimatique « 3_TM » où la canne ne peut remplacer les autres usages en raison d'une température limitante liée à l'altitude élevée sur la majorité de l'unité rendant sa culture non productive.

La démarche globale de l'évaluation des bilans de GES des changements d'usages agricoles par unité pédoclimatique est détaillée dans la Figure 5.2.

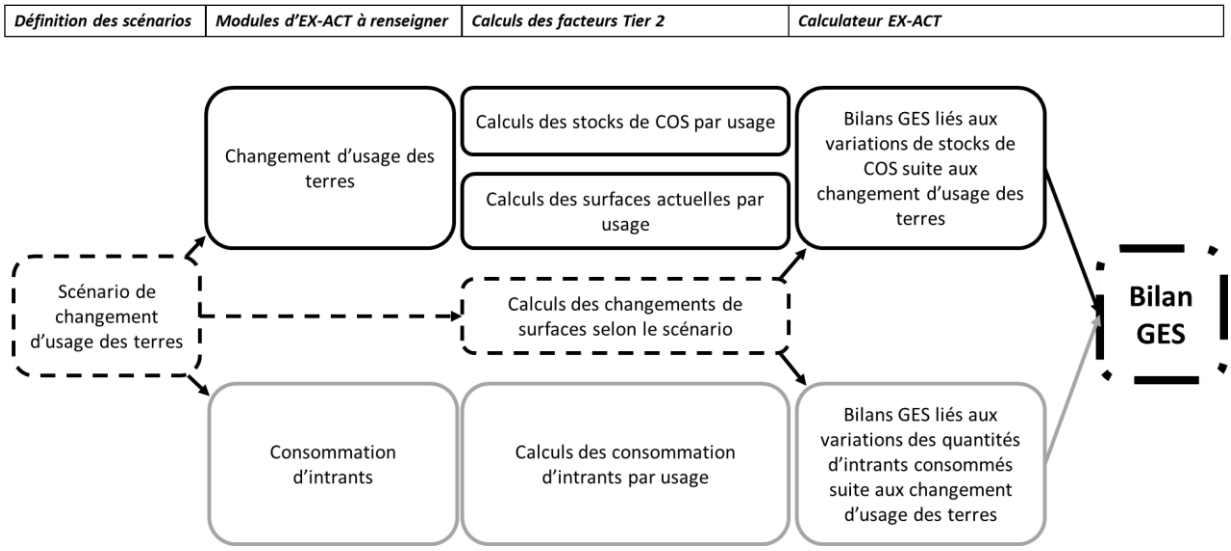


FIGURE 5.2 : DEMARCHE GLOBALE DE L'UTILISATION DU CALCULATEUR EX-ACT AU SEIN D'UNE UNITE PEDOCLIMATIQUE POUR L'EVALUATION DU BILAN GES LIE AUX CHANGEMENTS D'USAGE DES TERRES A LA REUNION

5.3 Résultats

5.3.1 Impacts des changements d'usages sur les stocks de COS

Afin d'évaluer plus précisément les émissions de CO_2 du compartiment sol liées aux changements d'usage des terres, les variations de stocks de COS pour l'horizon 0-30 cm par unité pédoclimatique entre usages agricoles ont été calculées selon la méthode développée dans la section 4.2. L'approche spatiale par la méthode des « buffers » a permis de tester 571 couples canne à sucre – autres usages, sur l'ensemble du territoire agricole dont 257 ont été retenus car présentant une différence de stock de COS statistiquement significative au seuil de risque alpha = 5% (Figure 5.3).

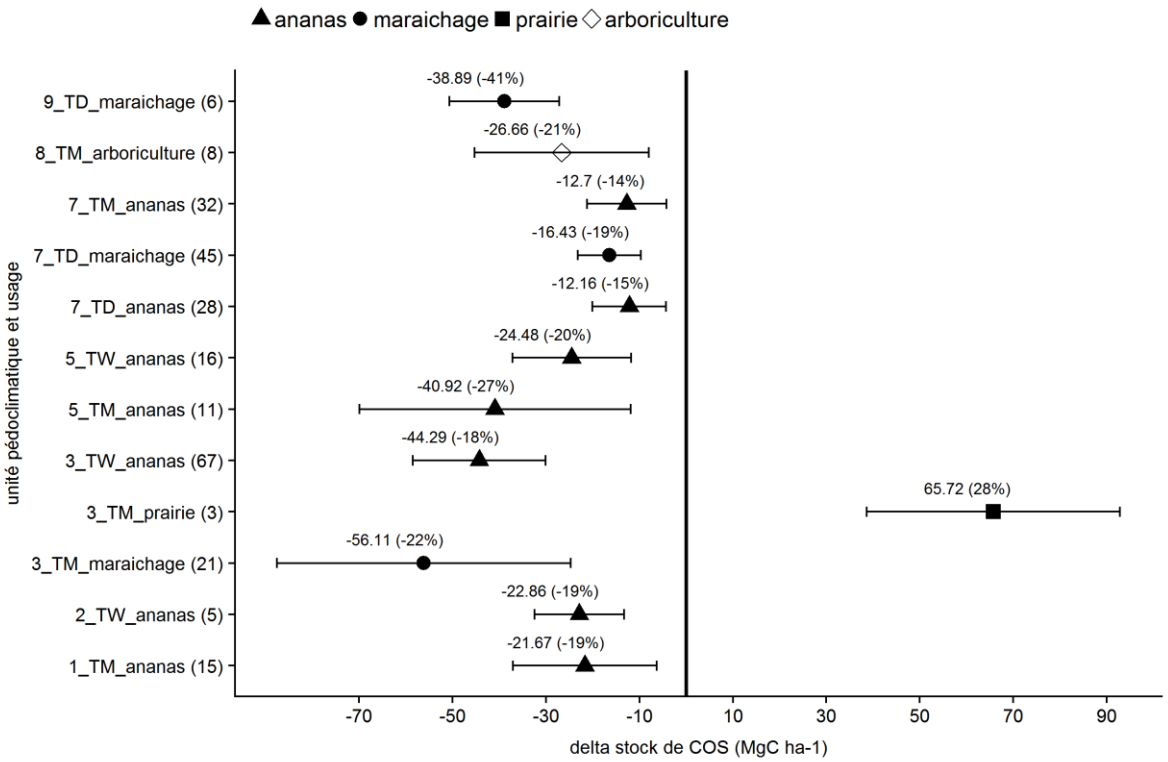


FIGURE 5.3 : DIFFERENCE MOYENNE DE STOCK DE COS (ΔSTOCK) (MGC HA-1) (SUR 0- 30 CM DE PROFONDEUR) SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENTE DE ZERO PAR UNITE PEDOCLIMATIQUE ET USAGE AVEC INTERVALLE DE CONFIANCE A 95%. LE NOMBRE D'ECHANTILLONS 'AUTRE USAGE' UTILISE POUR CALCULER LA MOYENNE DES DIFFERENCES DE STOCKS DE COS PAR UNITE PEDOCLIMATIQUE ET USAGE EST INDIQUE ENTRE PARENTHESES SUR L'AXE DES ORDONNEES. LE POURCENTAGE INDIQUE ENTRE PARENTHESES SUR LE GRAPHIQUE A DROITE DU ΔSTOCK MOYEN CORRESPOND AU COEFFICIENT DE VARIATION PAR RAPPORT AU STOCK DE CANNE A SUCRE.

Les différences de stock de COS sous culture d'ananas et sous maraîchage représentent la majorité des différences de stocks qui ont pu être validées tandis qu'une seule différence significative de stock de COS a pu être observée entre l'arboriculture et la canne à sucre ainsi qu'entre la prairie et la canne à sucre. Dans les 10 unités pédoclimatiques où, au moins, une différence de stock de COS a été observée, le stock de COS sous ananas, maraîchage et arboriculture est inférieur au stock de COS sous canne à sucre (-14 à -41 % du stock initial sous canne à sucre), seul le stock de COS sous prairie dans l'unité '3_TM' est supérieur au stock de COS de la canne à sucre (+28%).

En effet, le déstockage de carbone organique du sol, toutes unités pédoclimatiques et tous usages confondus, est en moyenne de -21 MgC ha^{-1} (- 29 MgC ha^{-1} hors prairie). Le déstockage moyen sous ananas est de -26 MgC ha^{-1} tandis que le déstockage moyen sous maraîchage est de -37 MgC ha^{-1}, toutes unités pédoclimatiques confondues. L'analyse des différences de stocks par type de sol et climat, tous changements d'usages confondus (hors cas particulier de la prairie), semble indiquer que le déstockage du COS est plus important dans les climats humides (Tropical Moist et Tropical Wet) avec un déstockage moyen de -32 MgC ha^{-1} et -30 MgC ha^{-1}, que dans le climat Tropical Dry (-23 MgC ha^{-1}). Les sols classés « VOL » (1,2, 3 et 5) semblent également plus sensibles au déstockage de carbone que

les sols classés « LAC » ou « HAC » (7, 8 et 9) avec un déstockage moyen de -35 MgC ha^{-1} et -21 MgC ha^{-1}, respectivement.

L'approche spatiale par proximité a donc permis de mettre en évidence 12 valeurs de stock de COS significativement différentes de celles sous canne à sucre dans les 10 unités pédoclimatiques considérées. Les autres valeurs du stock de COS sont donc égales à celles sous canne à sucre. D'autre part, les deux méthodes de calcul des stocks de COS (méthodes 'Globale' et '∑UPC' de l'approche générale où le territoire est considéré comme une unique entité de sol et de climat), montrent des stocks de COS différents par rapport à l'approche spatiale du territoire (Tableau 5.2). En effet, les stocks de COS pour les usages autres que la canne à sucre sont plus élevés avec la méthode 'Globale'. Contrairement à la méthode '∑UPC' selon laquelle le stock moyen de COS par usage a été calculé à partir des échantillons à l'intérieur des buffers, la méthode 'Globale' traduit la variabilité du stock de COS dans les unités pédoclimatiques dont les valeurs extrêmes modifient la moyenne des stocks de COS par usage (Tableau 5.2).

TABLEAU 5.2 : DESCRIPTION DES UNITES PEDOCLIMATIQUES ET STOCKS DE COS RENSEIGNES DANS L'OUTIL EX-ACT. LES DIFFÉRENCES DE STOCKS (MGC HA-1) SONT INDIQUÉES ENTRE PARENTHÈSES

UPC	Noms	Sol EX-ACT	Climat EX-ACT	Stock de COS (MgC ha^{-1})				
				Ananas	Maraîchage	Prairie	Verger	Canne à sucre
Globale	-	VOL	Tropical Moist	128	147	210	163	135
∑UPC	-	VOL	Tropical Moist	112	114	219	125	133
1_TM	Ga_TM	VOL	Tropical Moist	**84 (-22)**	106	106	106	106
2_TW	P_TW	VOL	Tropical Wet	**96 (-23)**	119	119	119	119
3_TM	Aa_TM	VOL	Tropical Moist	194	**138 (-56)**	**260 (+66)**	194	194
3_TW	Aa_TW	VOL	Tropical Wet	**179 (-44)**	223	223	223	223
5_TM	Ag_TM	VOL	Tropical Moist	**108 (-41)**	149	149	149	149
5_TW	Ag_TW	VOL	Tropical Wet	**125 (-24)**	149	149	149	149
7_TD	H_TD	LAC	Tropical Dry	**71 (-12)**	**67 (-16)**	83	83	83
7_TM	H_TM	LAC	Tropical Moist	**77 (-13)**	90	90	90	90
8_TM	Hh_TM	LAC	Tropical Moist	120	120	120	**94 (-27**)	120
9_TD	Hi_TD	HAC	Tropical Dry	86	**47 (-39)**	86	86	86

Les valeurs de stock de COS des usages agricoles (Tableau 5.2) sont ensuite implémentées dans l'outil EX-ACT comme facteurs d'émissions Tier 2.

5.3.2 Impacts des changements d'usage sur les bilans GES par approche spatiale

5.3.2.1 Les unités pédoclimatiques concernées par des changements d'usages

Les unités pédoclimatiques considérées sont celles pour lesquelles une différence significative de stock entre la canne et un autre usage, au moins, a pu être observée. Les surfaces agricoles des 10 unités pédoclimatiques ainsi retenues (Figure 5.4) représentent 71 % de la surface agricole (46 536 ha), et 70% des quantités totales de COS des sols agricoles de La Réunion (cf. section 4.2).

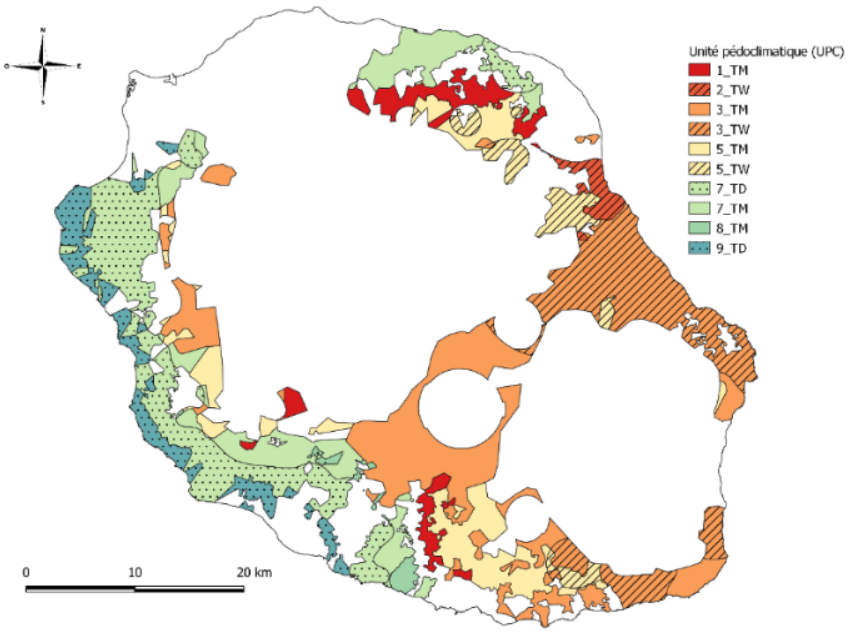


FIGURE 5.4 : CARTOGRAPHIE DES UNITES PEDOCLIMATIQUES CONSIDEREES DANS EX-ACT

5.3.2.2 Les émissions de GES dans la configuration actuelle des usages des terres

Dans la configuration actuelle des usages des terres (sans projet), les émissions annuelles de GES pour la somme des unités pédoclimatiques (Approche spatiale) et pour l'ensemble des unités pédoclimatiques considérées en une seule entité (Approche générale (∑UPC et Globale)), présentent des résultats similaires (Figure 5.5). En effet, les données d'entrées d'EX-ACT concernant le bétail sont identiques, les quantités d'intrants renseignées sont similaires, et les données concernant les biomasses de la composante « Pérenne » sont les valeurs définies par défaut (facteur Tier 1). Sans projet, les données sur les stocks de COS ne sont pas impliquées dans l'estimation des émissions annuelles de GES dans la configuration actuelle des usages des terres, ce qui explique les similitudes entre les deux méthodes.

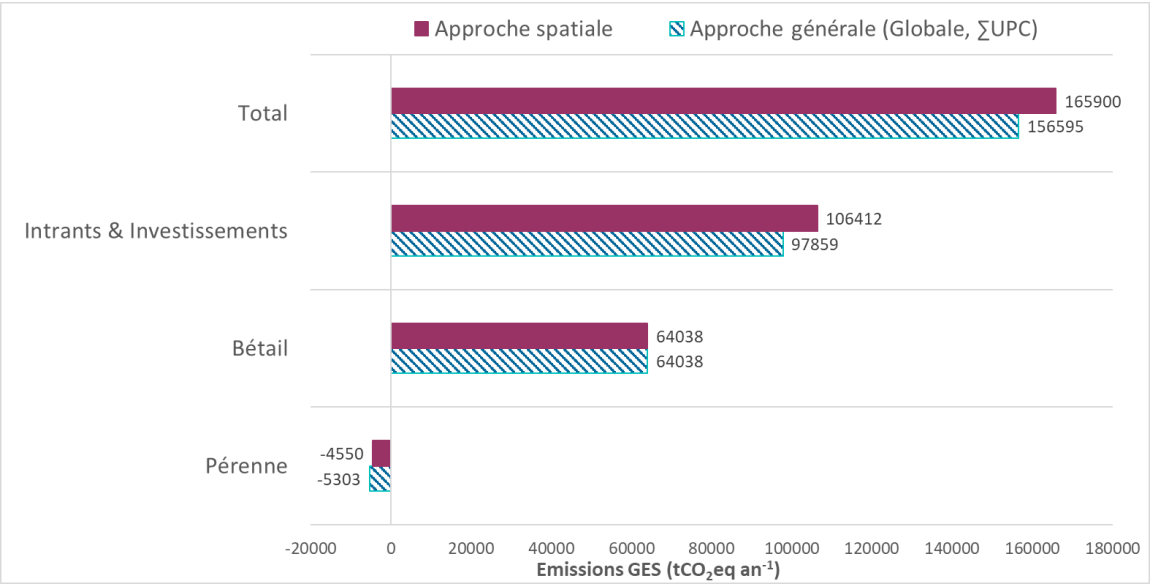


FIGURE 5.5 : EMISSIONS ANNUELLES DE GES, DANS LA CONFIGURATION ACTUELLE DES USAGES DES TERRES, SELON LES DEUX APPROCHES DU TERRITOIRE (SPATIALE ET GENERALE)

5.3.2.3 Quantification et identification des sources principales des émissions de GES

Après 20 ans de changements d'usage (avec projet), les bilans des émissions annuelles de GES pour l'ensemble des 10 unités pédoclimatiques considérées (méthode 'Spatiale') montrent trois scénarios sources de carbone ('Ana', 'Mar', 'tt-canne') et un scénario puits de carbone ('Gol') (Figure 5.6). Le bilan positif des émissions de GES des scénarios 'Ana' (0.06 $tCO_2eq\ ha^{-1}\ an^{-1}$) et 'Mar' (0.10 $tCO_2eq\ ha^{-1}\ an^{-1}$) est 2 à 3 fois plus faible que celui du scénario 'tt-canne' (0.17 $tCO_2eq\ ha^{-1}\ an^{-1}$) tandis que le bilan des émissions de GES du scénario 'Gol' est négatif (-0.08 $tCO_2eq\ ha^{-1}\ an^{-1}$).

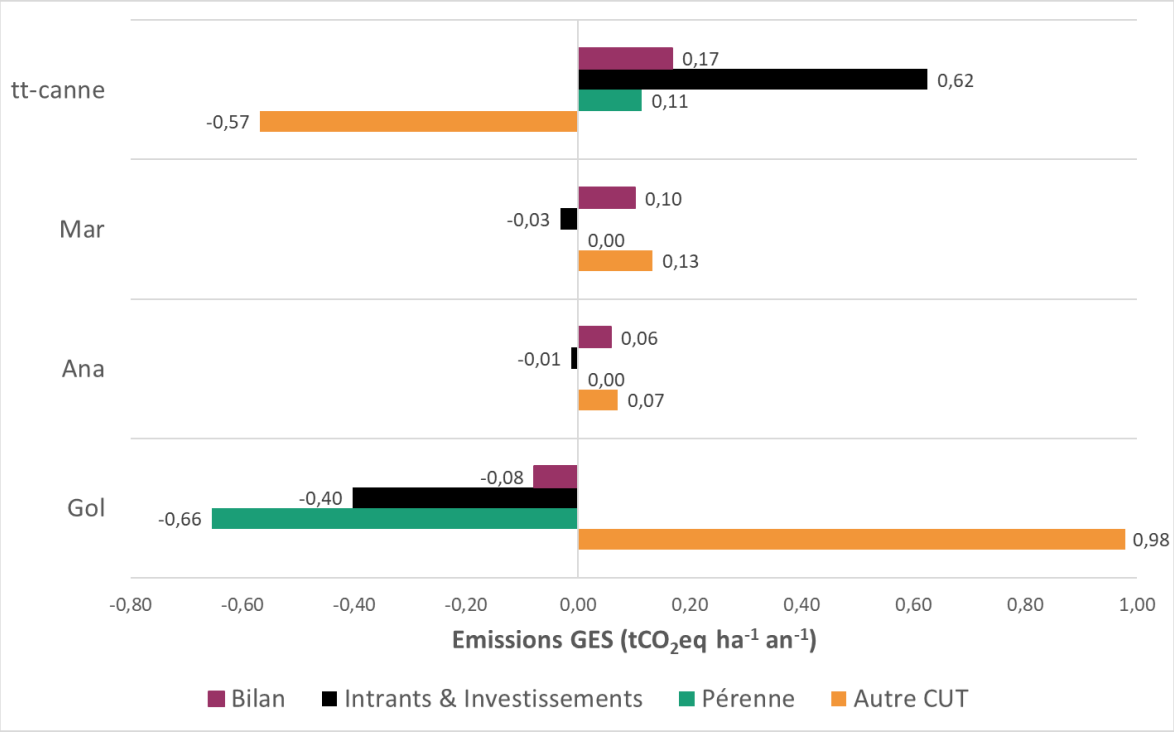


FIGURE 5.6 : BILANS DES EMISSIONS ANNUELLES DE GES PAR COMPOSANTE (POSTE D'EMISSIONS) DES 4 SCENARIOS DE CHANGEMENTS D'USAGES DES TERRES SUR L'ENSEMBLE DES 10 UNITES PEDOCLIMATIQUES

Le bilan des émissions de GES est détaillé par composante pour chaque scénario de changement d'usage dans la Figure 5.6 (Tableau 5.3). Les bilans positifs (sources de carbone) des scénarios 'Mar' et 'Ana' résultent d'émissions de GES de la composante « Autre CUT » liées à l'augmentation des surfaces en maraîchage et ananas, sans être compensés par la baisse des émissions des « Intrants & Investissements ». Un changement d'usage général vers la canne à sucre (scénario 'tt-canne') présente également un bilan source de carbone, notamment en raison d'émissions liées aux « Intrants & Investissements » et à la composante « Pérenne » (0.73 $tCO_2eq\ ha^{-1}\ an^{-1}$) non compensées par le bilan négatif (puits de carbone) de la composante « Autre CUT » (-0.57 $tCO_2eq\ ha^{-1}\ an^{-1}$). La modélisation de la conversion des surfaces de canne à sucre en autres usages des terres en raison de la fermeture de l'usine sucrière du Gol, présente un bilan puits de carbone. En effet, les émissions positives de la composante « Autre CUT » (0.98 $tCO_2eq\ ha^{-1}\ an^{-1}$) sont inférieures aux émissions négatives des composantes « Intrants & Investissements » et « Pérenne » (-1.06 $tCO_2eq\ ha^{-1}\ an^{-1}$).

TABLEAU 5.3 : EMISSIONS ANNUELLES DE GES EN TCO2EQ AN-1 HA-1 PAR COMPOSANTE POUR LES 4 SCENARIOS SELON UNE APPROCHE PAR UNITE PEDOCLIMATIQUE (METHODE SPATIALE) ET UNE APPROCHE GENERALE DU TERRITOIRE (METHODES ΣUPC ET GLOBALE)

Emissions annuelles de GES en tCO2eq an-1 ha-1

Spatiale	**Scénario 'tt-canne'**			**Scénario 'Gol'**			**Scénario 'Ana'**			**Scénario 'Mar'**		
	Sans projet	Avec projet	Bilan	Sans projet	Avec projet	Bilan	Sans projet	Avec projet	Bilan	Sans projet	Avec projet	Bilan
Changements d'usages des terres	0,00	-0,57	-0,57	0,00	0,98	0,98	0,00	0,07	0,07	0,00	0,13	0,13
Pérenne	-0,13	-0,02	0,11	-0,14	-0,79	-0,66	-0,14	-0,14	0,00	-0,14	-0,14	0,00
Intrants & Investissements	1,62	1,62	0,00	1,95	1,95	0,00	1,95	1,95	0,00	1,95	1,95	0,00
Bétail	3,48	4,10	0,62	3,24	2,84	-0,40	3,24	3,23	-0,01	3,24	3,21	-0,03
Bilan	4,97	5,14	**0,17**	5,06	4,98	**-0,08**	5,06	5,11	**0,06**	5,06	5,16	**0,10**
ΣUPC	**Scénario 'tt-canne'**			**Scénario 'Gol'**			**Scénario 'Ana'**			**Scénario 'Mar'**		
	Sans projet	Avec projet	Bilan	Sans projet	Avec projet	Bilan	Sans projet	Avec projet	Bilan	Sans projet	Avec projet	Bilan
Changements d'usages des terres	0,00	-0,05	-0,05	0,00	0,31	0,31	0,00	0,06	0,06	0,00	0,19	0,19
Pérenne	-0,16	-0,02	0,14	-0,16	-0,75	-0,59	-0,16	-0,16	0,00	-0,16	-0,16	0,00
Intrants & Investissements	2,44	2,44	0,00	1,95	1,95	0,00	1,95	1,95	0,00	1,95	1,95	0,00
Bétail	3,21	3,62	0,41	2,98	2,66	-0,32	2,98	2,98	-0,01	2,98	2,96	-0,02
Bilan	5,49	6,00	**0,50**	4,77	4,17	**-0,60**	4,77	4,83	**0,06**	4,77	4,94	**0,17**
Globale	**Scénario 'tt-canne'**			**Scénario 'Gol'**			**Scénario 'Ana'**			**Scénario 'Mar'**		
	Sans projet	Avec projet	Bilan	Sans projet	Avec projet	Bilan	Sans projet	Avec projet	Bilan	Sans projet	Avec projet	Bilan
Changements d'usages des terres	0,00	1,48	1,48	0,00	-0,46	-0,46	0,00	0,04	0,04	0,00	0,05	0,05
Pérenne	-0,16	-0,02	0,14	-0,16	-0,75	-0,59	-0,16	-0,16	0,00	-0,16	-0,16	0,00
Intrants & Investissements	2,44	2,44	0,00	1,95	1,95	0,00	1,95	1,95	0,00	1,95	1,95	0,00
Bétail	3,21	3,62	0,41	2,98	2,66	-0,32	2,98	2,98	-0,01	2,98	2,96	-0,02
Bilan	5,49	7,52	**2,03**	4,77	3,41	**-1,37**	4,77	4,80	**0,03**	4,77	4,80	**0,03**

5.3.2.4 Bilan des émissions de CO_2 de la biomasse et du sol

La composante « Autre CUT » joue un rôle important dans le bilan des émissions de GES pour l'ensemble des scénarios proposés, il est donc intéressant d'analyser les émissions de GES liées aux changements d'usages des terres agricoles qui sont principalement des émissions de CO_2 de deux compartiments : la biomasse et le sol (Figure 5.7; Tableau 5.4).

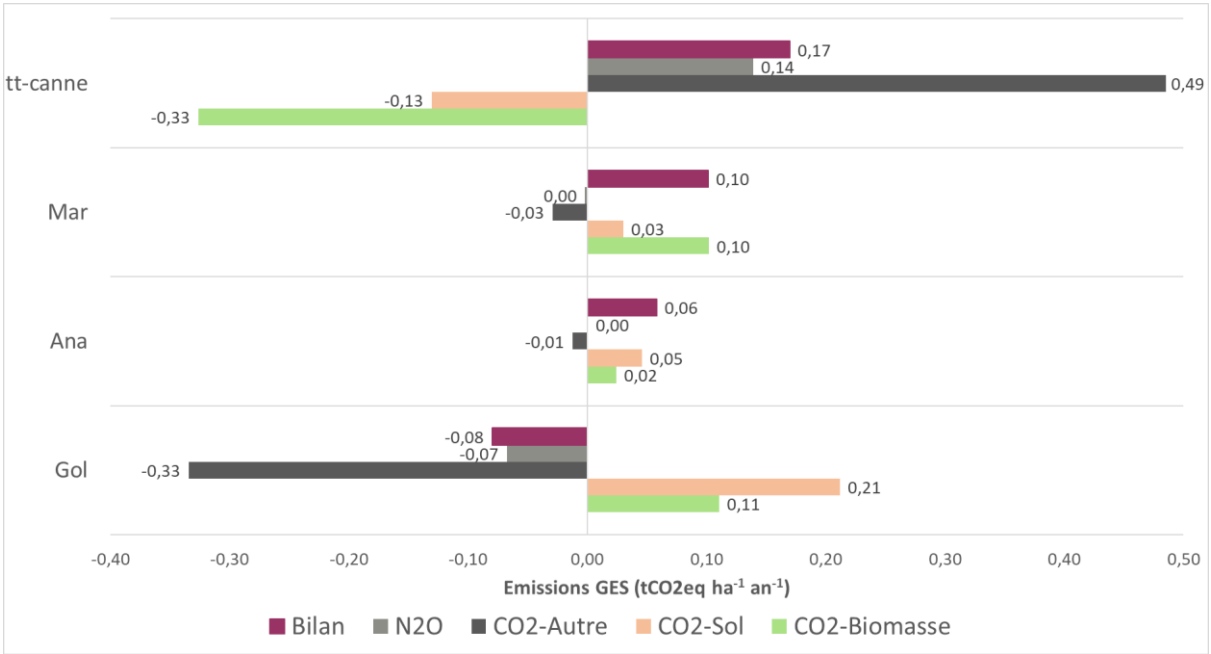


FIGURE 5.7 : BILANS DES EMISSIONS ANNUELLES DE GES PAR TYPE DE GES DES 4 SCENARIOS DE CHANGEMENTS D'USAGES DES TERRES SUR L'ENSEMBLE DES 10 UNITES PEDOCLIMATIQUES

Les changements d'usages de la canne à sucre vers le maraîchage ou l'ananas sont sources de CO_2, pour le compartiment sol en raison de stocks de COS sous maraîchage et ananas inférieurs ou égaux aux stocks de COS sous canne dans les 10 unités pédoclimatiques considérées, et pour le compartiment biomasse en raison de biomasse aérienne et racinaire du maraîchage (1 MgC ha^{-1}) ou de l'ananas (10 MgC ha^{-1}) inférieures à la biomasse de la canne à sucre (estimée à 21 MgC ha^{-1}). Les émissions de CO_2 pour le scénario 'Gol' résultent des mêmes causes, c'est-à-dire des stocks de COS et des quantités de biomasse plus faibles sous maraîchage et ananas que sous canne à sucre. La différence du scénario 'Gol' est le changement supplémentaire de surfaces de canne à sucre en prairie et arboriculture dont seul le stock de COS de l'usage arboriculture pour l'unité pédoclimatique « 8_TM » est inférieur au stock de COS de canne à sucre, les autres stocks de COS de l'arboriculture et de la prairie étant identiques à ceux de la canne à sucre. A l'inverse, le scénario 'tt-canne' impliquant un stock de COS et une quantité de biomasse plus élevés sous canne à sucre est un puits de CO_2 pour les deux compartiments biomasse et sol.

Cependant, la Figure 5.7 montre également l'importance des autres GES dans les bilans des scénarios : N_2O et le CO_2-Autre. En effet, les émissions de N_2O sont liées aux intrants tandis que les émissions de CO_2-Autre sont liées à l'apport d'urée (95% des apports azotés pour la canne à sucre se font sous forme d'urée, à dire d'expert) et au chaulage pour la culture de la canne à sucre à La Réunion. Pour ces raisons, le scénario 'tt-canne' présente des émissions de N_2O et de CO_2-Autre puisque les quantités d'intrants et notamment d'urée augmentent si toute la surface agricole est cultivée en canne à sucre. A l'inverse, le scénario 'Gol' modélisant une baisse de la moitié des surfaces en canne à sucre présente des émissions négatives de N_2O et de CO_2-Autre.

TABLEAU 5.4 : BILANS DES EMISSIONS ANNUELLES DE GES EN TCO2EQ AN-1 HA-1 PAR GAZ A EFFET DE SERRE ET LEUR COMPARTIMENT D'ORIGINE POUR LES 4 SCENARIOS SELON UNE APPROCHE PAR UNITE PEDOCLIMATIQUE (METHODE SPATIALE) ET UNE APPROCHE GENERALE DU TERRITOIRE (METHODES ΣUPC ET GLOBALE)

Bilans des émissions annuelles de GES en tCO2eq an^{-1} ha^{-1}				
Spatiale	**Scénario 'tt-canne'**	**Scénario 'Gol'**	**Scénario 'Ana'**	**Scénario 'Mar'**
CO2-Biomasse	-0,33	0,11	0,02	0,10
CO2-Sol	-0,13	0,21	0,05	0,03
CO2-Autre	0,49	-0,33	-0,01	-0,03
N2O	0,14	-0,07	0,00	0,00
Bilan	**0,17**	**-0,08**	**0,06**	**0,10**
∑UPC	**Scénario 'tt-canne'**	**Scénario 'Gol'**	**Scénario 'Ana'**	**Scénario 'Mar'**
CO2-Biomasse	-0,33	0,17	0,02	0,10
CO2-Sol	0,41	-0,46	0,04	0,08
CO2-Autre	0,31	-0,24	-0,01	-0,02
N2O	0,11	-0,08	0,00	0,00
Bilan	**0,50**	**-0,60**	**0,06**	**0,17**
Globale	**Scénario 'tt-canne'**	**Scénario 'Gol'**	**Scénario 'Ana'**	**Scénario 'Mar'**
CO2-Biomasse	-0,33	0,17	0,02	0,10
CO2-Sol	1,93	-1,22	0,01	-0,05
CO2-Autre	0,31	-0,24	-0,01	-0,02
N2O	0,12	-0,08	0,00	0,00
Bilan	**2,03**	**-1,37**	**0,03**	**0,03**

5.3.2.5 Comparaison de l'approche par unité pédoclimatique (Spatiale) et de l'approche générale du territoire (Globale et ∑UPC)

L'approche par unité pédoclimatique (méthode 'Spatiale'), a été comparée à une approche plus générale du territoire (méthodes '∑UPC' et 'Globale'), habituellement utilisée avec ce type de calculateur dont l'objectif est d'évaluer les émissions de GES d'un projet sur un territoire considéré comme une seule entité. L'objectif est de mettre en évidence l'intérêt de l'approche par unité pédoclimatique avec des variations de stocks de COS entre usages agricoles renseignées comme facteur Tier 2 pour l'estimation des bilans de GES lors de changements d'usages des terres agricoles.

Les deux approches conduisent à des différences de bilan de GES très importantes (Figure 5.8). En effet, si les scénarios 'Mar', 'Ana' produisent des bilans de carbone équivalents selon la méthode utilisée, les deux autres scénarios ('Gol', 'tt-canne') produisent des bilans très différents en termes d'ampleur des émissions de GES. En valeurs absolues, les émissions de GES des méthodes '∑UPC' et 'Globale' sont supérieures, jusqu'à 17 fois, aux émissions de GES estimées avec la méthode 'Spatiale'.

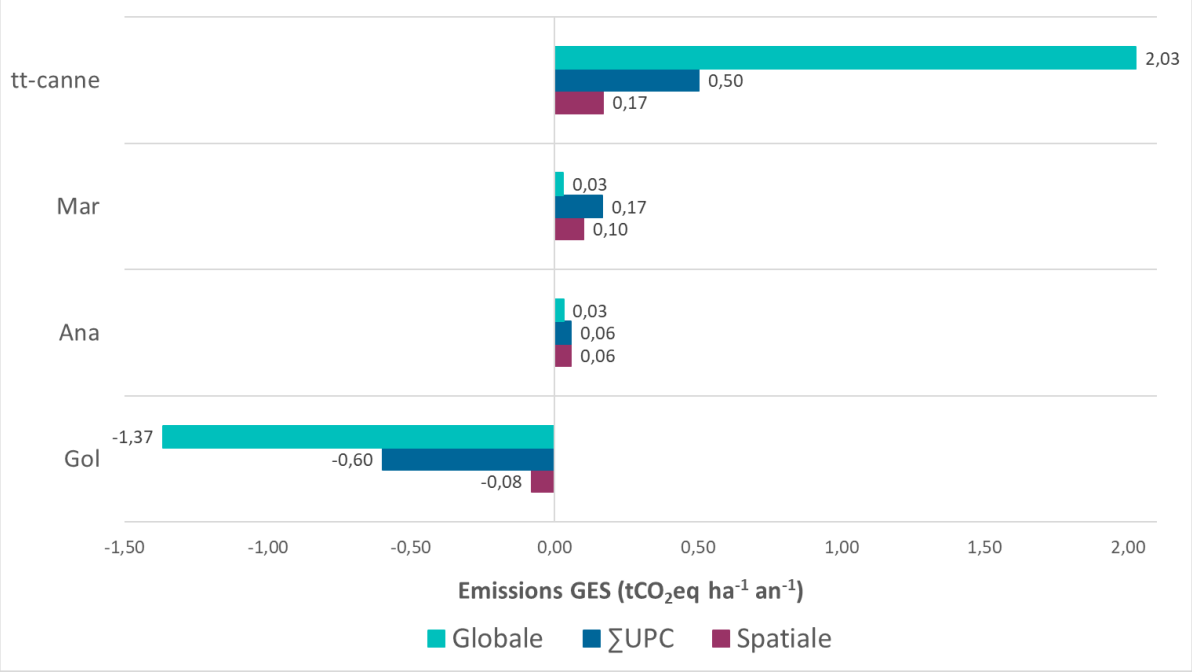


FIGURE 5.8 : BILANS DES EMISSIONS ANNUELLES DE GES (TCO2EQ HA-1 AN-1), POUR CHAQUE SCENARIO DE CHANGEMENTS D'USAGES, SELON UNE APPROCHE PAR UNITE PEDOCLIMATIQUE (SPATIALE) OU UNE APPROCHE GENERALE DU TERRITOIRE (∑UPC ET GLOBALE)

Pour les scénarios ayant des bilans très différents en termes d'ampleur des émissions de GES ('tt-canne' et 'Gol') (Figure 5.9 et Figure 5.10), l'analyse des composantes de ces bilans montrent des différences d'ampleur mais aussi des contradictions entre source ou puits de GES pour la composante « Autre CUT » selon les méthodes.

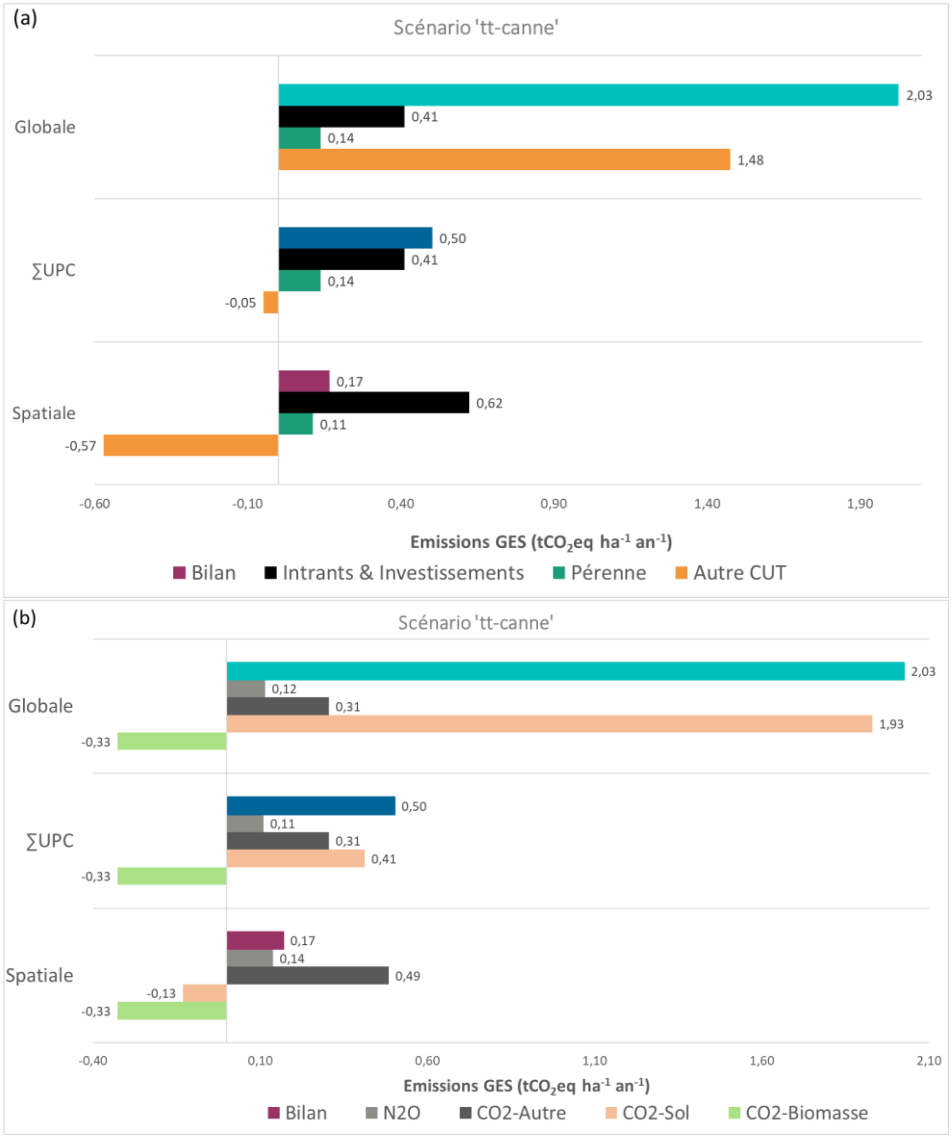


FIGURE 5.9 : BILANS DES EMISSIONS ANNUELLES DE GES DU SCENARIO 'TT-CANNE' PAR COMPOSANTE (A) ET PAR TYPE DE GES (B) SELON LES TROIS METHODES

Dans le scénario 'tt-canne' (Figure 5.9a), la composante « Autre CUT » présente un bilan positif (source de GES) selon la méthode Globale alors que son bilan est négatif selon les méthodes Spatiale et ΣUPC. Or, l'analyse des émissions de CO_2 du compartiment sol met en évidence un bilan positif selon les méthodes Globale et ΣUPC (Figure 5.9b). Selon la méthode Globale, les stocks de COS sous maraîchage (147 MgC ha-1) et arboriculture (163 MgC ha-1) sont plus élevés que les stocks de COS sous canne à sucre (135 MgC ha-1). En effet, ces valeurs sont des moyennes sur l'ensemble des unités pédoclimatiques, or les valeurs extrêmes de stocks de COS dans certaines unités pédoclimatiques augmentent la moyenne des stocks de COS par usage (méthode Globale) comparativement aux données issues des buffers (méthode ΣUPC). Par conséquent, lorsque les surfaces en maraichage et en arboriculture passent sous culture de canne à sucre, le compartiment sol émet du CO_2 selon les deux méthodes Globale et ΣUPC (Figure 5.9b) et dans le cas de la méthode Globale, cette surévaluation des émissions de CO_2 fait de la composante « Autre CUT » une source de carbone contrairement aux méthodes Spatiale et ΣUPC pour lesquelles la composante « Autre CUT » est un puits de carbone (Figure 5.9a).

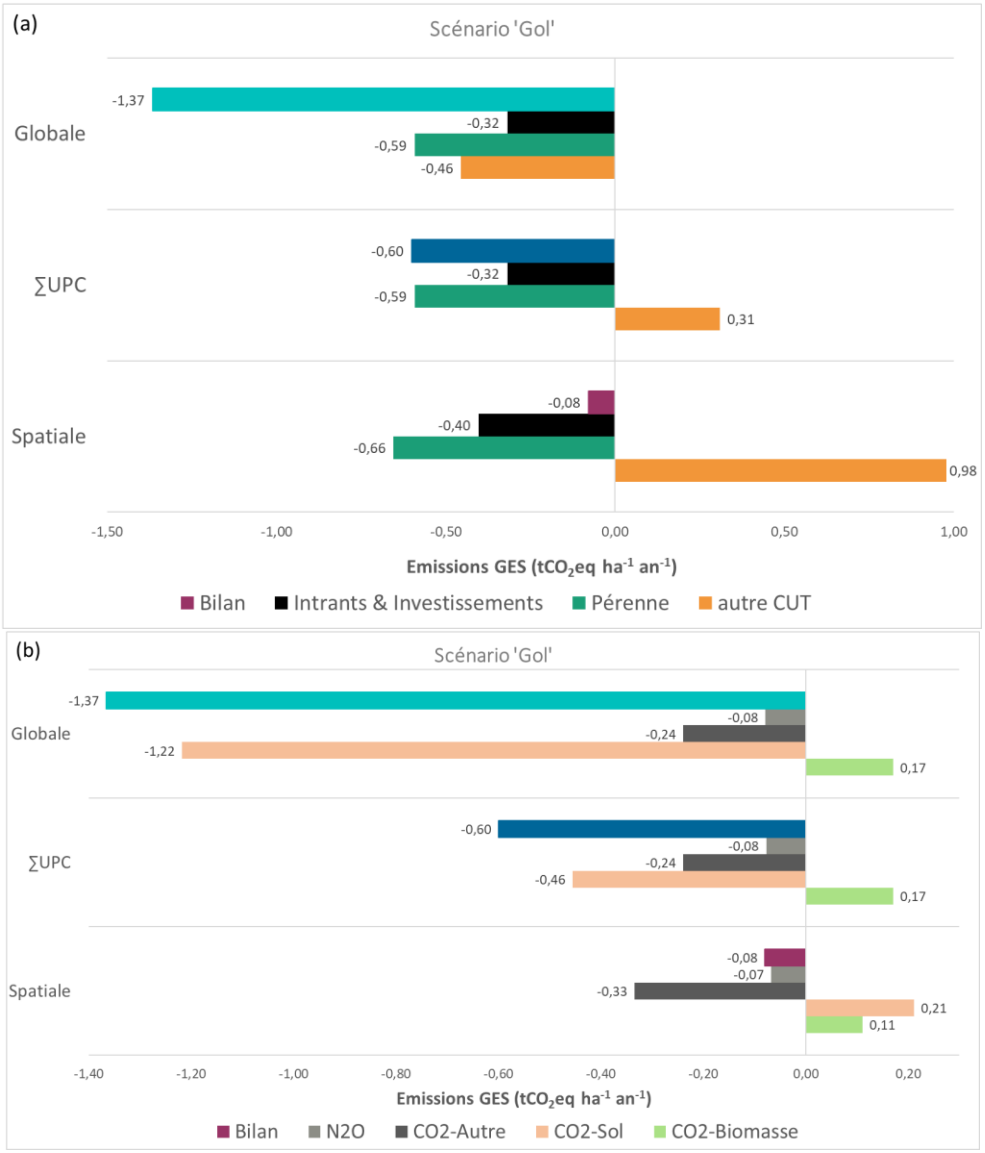


FIGURE 5.10 : BILANS DES EMISSIONS ANNUELLES DE GES DU SCENARIO 'GOL' PAR COMPOSANTE (A) ET PAR TYPE DE GES (B) SELON LES TROIS METHODES

Dans le scénario 'Gol', la situation est inverse : la composante « Autre CUT » présente un bilan négatif (puits de GES) selon la méthode Globale alors que son bilan est positif selon les méthodes Spatiale et ΣUPC (Figure 5.10a). L'analyse des émissions de CO_2 du compartiment sol montre des bilans négatifs selon les méthodes Globale et ΣUPC (Figure 5.10b). Selon la méthode Globale, le stock de COS sous maraîchage (147 MgC ha-1) et arboriculture (163 MgC ha-1) étant plus élevés que le stock de COS sous canne à sucre (135 MgC ha-1), la conversion des surfaces en canne à sucre vers le maraichage et l'arboriculture a pour conséquence un stockage de COS dans le sol (Figure 5.10). Cette surévaluation importante du stockage de carbone dans les sols fait de la composante « Autre CUT » de la méthode Globale un puits de carbone contrairement aux méthodes Spatiale et ΣUPC pour lesquelles la composante « Autre CUT » est une source de carbone (Figure 5.10a).

5.4 Discussion

5.4.1 Limites de l'étude : un fort besoin de données spatialisées

Peu de variations de stock entre usages sont effectivement détectées à l'échelle de l'unité pédoclimatique (**TABLEAU 5.5**) en raison d'une variabilité résiduelle des stocks de carbone du sol à l'intérieur d'une unité pédoclimatique, mais se pose également le problème de la répartition spatiale des usages agricoles, l'unité pédoclimatique « 3_TM » en étant l'illustration. Dans cette zone, les zones cultivées en canne à sucre sont éloignées des zones maraichères bien que dans la même unité pédoclimatique. Une comparaison de ces stocks à l'échelle de l'unité pédoclimatique serait donc biaisée du fait de la dissociation spatiale de ces usages. En effet, le stock de COS du maraîchage est plus élevé que celui de la canne dans l'unité « 3_TM » et dans l'unité « 8_TD » alors que la méthode des « buffers » met en évidence un stock de COS du maraîchage inférieur à celui de la canne à sucre dans l'unité « 3_TM » et un stock de COS non significativement différent de celui de la canne à sucre dans l'unité « 8_TD », permettant ainsi d'éviter un biais géographique.

TABLEAU 5.5 : DIFFERENCE DE STOCKS DE CARBONE DU SOL (MGC HA-1) PAR UNITE PEDOCLIMATIQUE ET USAGE

UPC	Usage	Différence de stock COS (MgC ha^{-1})	pvalue (ANOVA)
3_TM	Maraîchage	27,35	0,00986
	Prairie	106,62	< 0.001
3_TW	Ananas	-25,35	0,0107
3_WTM	Prairie	68,23	0,0176
5_TM	Ananas	-35,67	0,0493
5_TW	Ananas	-46,67	0,000297
7_TD	Maraîchage	-15,38	< 0.001
	Prairie	53,01	0,00875
8_TD	Maraîchage	29,65	0,0275

D'autre part, un nombre suffisant d'échantillons de sols pour chaque usage est nécessaire pour évaluer les effets des changements d'usage des sols sur les stocks de carbone organique du sol par unité spatiale homogène. Or, dans le jeu de données utilisé, les usages autres que la canne sont sous-représentés. En effet, l'analyse de sol sous canne à sucre est une obligation règlementaire européenne pour pouvoir bénéficier d'une subvention à la replantation, ce qui induit une sur-représentation des analyses de sol sous culture de canne à sucre dans la base de données. De nouvelles analyses de sol pour les usages agricoles autre que canne à sucre sur l'ensemble de la surface agricole permettraient une meilleure évaluation et une diminution de l'incertitude des impacts des changements d'usages des terres sur les stocks de carbone organique des sols.

De plus, les impacts des changements d'usage sur les stocks de carbone organique du sol sont évalués en synchronie dans cette étude et non en diachronie. Bien que le stock de carbone du sol sous canne à sucre soit considéré à l'équilibre en raison de la faible variation des teneurs en carbone par type de sol sur la période 1993 à 2015 (Allo et al., 2017), et des pratiques conservatrices vis-à-vis du carbone à La Réunion, aucune mesure de stock n'a été réalisée dans le temps suivant un réel changement d'usage de la canne à sucre vers un autre usage agricole (diachronie). La principale limite d'une approche synchronique est l'incertitude de caractérisation de l'état initial du stock, notamment en raison de la non prise en compte de la perte de carbone organique du sol due à l'érosion entre le stock initial de la référence réel (inconnu) et le stock final de la référence (mesuré), entrainant une sous-évaluation du déstockage de COS (Figure 5.11a). La méthode employée dans cette étude ne présente pas ce biais en raison du fait que le stock de COS de référence est celui de la canne à sucre, considéré comme étant à

l'équilibre en raison de teneurs en carbone stables sur une période de plus de 20 ans (1993-2015) grâce à des apports annuels de biomasse importants (Allo et al., 2017). Cette situation sous-entend un stock de COS sans perte significative de carbone par érosion sous canne à sucre et un stock de COS initial, inconnu en théorie, proche du stock de COS initial réel. La mesure de la différence entre le stock final de la référence et le stock final d'un autre usage en synchronie dans cette étude n'entraine donc pas une sous-évaluation du déstockage de carbone organique du sol (Figure 5.11b).

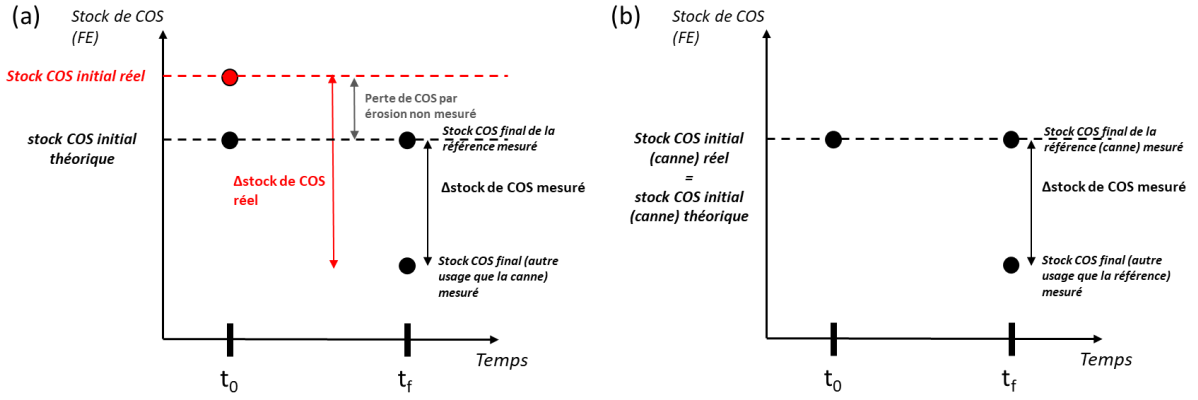


FIGURE 5.11 : SCHEMA CONCEPTUEL DE L'EVALUATION DE LA DIFFERENCE DE STOCK DE COS PAR APPROCHE SYNCHRONIQUE DANS L'HYPOTHESE D'UN DESTOCKAGE DE COS DANS LA SITUATION GENERALE THEORIQUE (A) ET DANS LA SITUATION DE CETTE ETUDE (B)

Enfin, le calculateur EX-ACT, bien que simple d'utilisation nécessite un nombre important de données lorsque des facteurs d'émissions Tier 2 sont à renseigner. De plus l'approche spatiale, nécessaire dans le cas de territoires hétérogènes, nécessite de renseigner les paramètres du calculateur dans chaque unité pédoclimatique. Or de telles données sont rares sur l'île de La Réunion. Les surfaces agricoles ont été évaluées à partir d'une cartographie établie à partir d'images satellitaires plutôt qu'à partir des données déclaratives agricoles qui ne permettent pas de calculer avec précision les surfaces selon la nomenclature des usages utilisés (ananas, arboriculture, canne à sucre, maraîchage, prairie) dans chaque unité pédoclimatique. La répartition des animaux sur le territoire est également une limite de ce travail. En effet, les effectifs spatialisés n'étant pas disponibles, les effectifs issus du recensement agricole de 2010 (Allo and Vigne, 2015; Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2010) ont été répartis à partir d'une couche d'information géographique localisant les bâtiments d'élevage. Les valeurs des intrants présentent aussi de fortes incertitudes. En effet, les pratiques étant très variables et non connues, notamment dans l'espace, l'hypothèse a été faite que les conseils en intrants pour chacune des cultures à La Réunion étaient respectés.

5.4.2 Limites du calculateur EX-ACT

Deux études (Grondin, 2012; Louis, 2013) proposent un inventaire des émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le territoire réunionnais pour chaque secteur d'activité dont le secteur agricole. Les émissions de GES du bétail et des sols agricoles, calculées à partir de l'ensemble du cheptel animal issu du recensement agricole de 2010 (Allo and Vigne, 2015; Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2010) et sur toute la surface agricole de l'île à l'aide de l'outil EX-ACT (FAO) sont présentées sur la Figure 5.12 et comparées aux résultats de ces deux études. Les émissions de GES liées au bétail (fermentation entérique et déjections animales) (134 452 tCO_2eq), aux sols agricoles (Grondin, 2012 :

sols agricoles et Louis, 2013 : canne ; culture-engrais ; Cette étude : Intrants) (137 678 tCO_2eq) et donc les émissions totales de ces deux postes (265 031 tCO_2eq) estimées à l'aide du calculateur EX-ACT sont comprises entre les estimations des deux autres inventaires (Grondin, 2012; Louis, 2013). Cependant, ces valeurs ne correspondent pas aux émissions totales pour le secteur agricole de La Réunion qui sont estimées respectivement à 304 056 tCO_2eq et 297 280 tCO_2eq pour les deux études (Grondin, 2012; Louis, 2013), représentant qu'une très faible part des émissions de GES, soit 4 et 7 % des émissions totales de GES du territoire pour les deux études (Grondin, 2012; Louis, 2013).

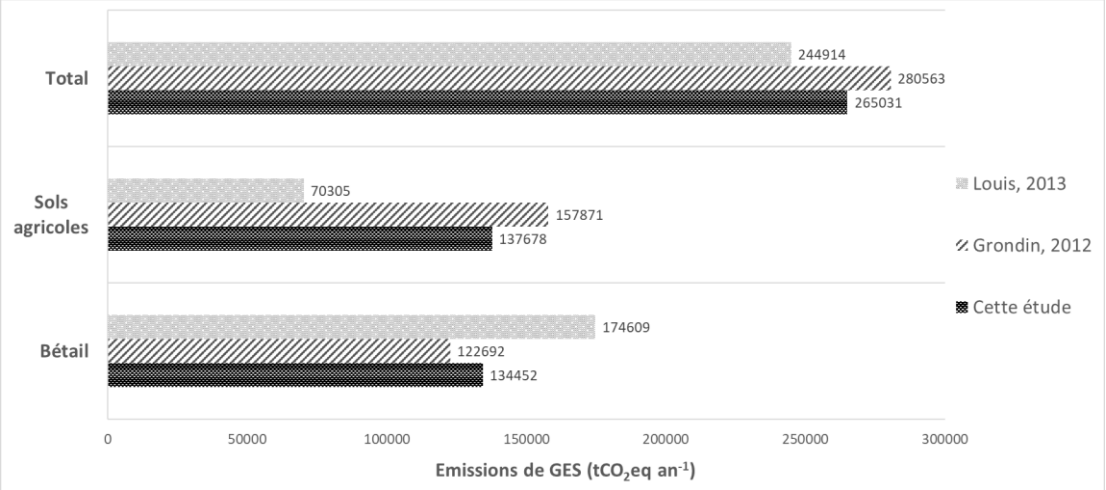


FIGURE 5.12 : EMISSIONS ANNUELLES DE GES (DES COMPARTIMENTS BETAIL ET INTRANTS) DU SECTEUR AGRICOLE SELON DIFFERENTES SOURCES

L'étude portant uniquement sur les impacts des changements d'usages sur les bilans de GES, une évaluation exhaustive du secteur agricole n'a pas été réalisée, aucune information sur les forêts n'a été renseigné, aucune consommation d'énergie et les effectifs animaux sont constants dans tous les scénarios proposés. Il est donc difficile de comparer des émissions GES par hectare et par an, même sans changement d'usage (5.7 $tCO_2eq\ ha^{-1}\ an^{-1}$) à d'autres territoires. De plus, le calculateur EX-ACT n'est pas conçu pour une description exhaustive du territoire (Colomb et al., 2012) et ne tient pas compte des émissions liées à l'alimentation animale importée, aux machines agricoles, aux émissions amonts des carburants, ni des émissions liées à l'apport d'azote dans les résidus de culture (Colomb et al., 2013a).

D'autre part, l'outil EX-ACT fournit un niveau d'incertitude dans ses résultats. Toutefois, étant donné que les calculs de l'outil EX-ACT sont basés sur des coefficients par défaut (Tier 1) ou des valeurs fournies par l'utilisateur (Tier 2) dans une même fiche, il est difficile de fournir des incertitudes pour les résultats finaux du calculateur. Cependant, les coefficients par défaut sont affectés d'incertitudes basées sur avis d'expert (incertitude faible 10 %, modérée 20 %, élevée 30 %, très élevée 50 %) ; utiliser des valeurs Tier 2 diminuant la catégorie d'incertitude. Sur la fiche de résultat, un degré d'incertitude est donné en pourcentage. Les degrés d'incertitudes dans cette étude, par scénario, par unité pédoclimatique ou encore par méthode, sont généralement autour de 30 %, traduisant une incertitude élevée. Cependant, une incertitude de 30 % est donc acceptable à l'échelle du territoire quand le but est de comparer les émissions de GES selon des scénarios de changements d'usages des terres et selon différentes approches.

5.4.3 Comparaison de l'approche par unité pédoclimatique et de l'approche générale du territoire

Les résultats de cette étude montrent qu'une approche générale et simplificatrice du territoire, lorsque celui-ci est considéré comme une seule et unique entité décrite par un seul type de sol et de climat, peut entrainer une évaluation erronée des stocks de COS, ce qui peut modifier l'ampleur du bilan des émissions de GES (Figure 5.8) mais également modifier le sens des émissions de GES pour la composante « Autre CUT » (Figure 5.9a et Figure 5.10a) en raison d'erreur sur l'évaluation de la capacité du sol à émettre ou à stocker du carbone (Figure 5.9b et Figure 5.10b) pour certains scénarios de changements d'usages des terres. Dans un territoire spatialement hétérogène d'un point de vue pédologique et climatique comme La Réunion, des variations de stocks de COS erronées dues à la non prise en compte de l'hétérogénéité du territoire peuvent potentiellement modifier l'ampleur et le sens des bilans GES suite à des scénarios de changements d'usages des terres. Cela démontre l'importance de la stratification du territoire (Milne et al., 2013) selon les déterminants biophysiques des stocks de COS (Powers et al., 2011) pour évaluer les effets des changements d'usages des terres sur les stocks de COS pour chaque unité pédoclimatique et ainsi pouvoir réaliser des bilans de GES à l'échelle du territoire.

5.5 Conclusion

Les variations de stocks de COS entre usages agricoles ont été évaluées par unité spatiale homogène issue de la stratification du territoire, c'est-à-dire où les conditions pédoclimatiques sont identiques. Dans les 10 unités pédoclimatiques pour lesquelles une différence significative de stock de COS entre la canne et un autre usage, au moins, a pu être observée, le déstockage moyen était de -21 MgC ha^{-1} (toutes unités pédoclimatiques et usages confondus). Cette approche en synchronie a ainsi mis en évidence que les stocks de COS étaient sensibles à des changements d'usages agricoles de la canne à sucre vers la culture d'ananas et de maraichage. Les valeurs de stocks de COS des différents usages agricoles dans ces 10 unités pédoclimatiques ont été utilisées comme facteurs d'émission Tier 2 dans le calculateur EX-ACT afin d'évaluer plus précisément les émissions de CO_2 du compartiment sol dans le cadre de scénarios de changements d'usage des terres agricoles. L'analyse des bilans GES des 4 scénarios de changement d'usage des terres agricoles considérés a effectivement montré le rôle important du compartiment sol dans les bilans GES.

D'autre part, une comparaison des bilans GES suite à des changements d'usages des terres agricoles a été réalisée entre une approche spatiale (par unité pédoclimatique) et une approche générale simplificatrice (habituellement utilisé pour ce type de calculateur) où le territoire est considéré comme une seule et unique entité, définie par un seul type de sol et de climat. Les résultats des bilans de GES ont montré qu'une approche spatiale est indispensable pour évaluer les variations de stocks de carbone organique du sol selon les changements d'usages agricoles afin de ne pas modifier l'ampleur et/ou le sens des émissions de GES, notamment pour le compartiment sol.

Pour le secteur agricole, les inventaires des émissions de GES dues aux activités anthropiques étant le principal outil des politiques d'atténuation du changement climatique, il semble indispensable d'évaluer les émissions de GES par une approche spatiale, en particulier lorsque le territoire concerné est spatialement hétérogène d'un point de vue pédologique et climatique. La mise en place de systèmes MRV fiables nécessitent donc, a minima, des facteurs d'émissions Tier 2 adaptés au territoire étudié et à l'hétérogénéité spatiale des stocks de COS et de leurs déterminants.

Références

Allo, M., Albrecht, A., Légier, P., Gogé, F., 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., in: Abstract Book Pedometrics 2017. Presented at the Pedometrics 2017, Wageningen: Wageningen University and Research Centre, ISRIC, Wageningen (Pays-Bas)., p. 19.

Allo, M., Vigne, M., 2015. Estimations des productions et des besoins de biomasse d'origine agricole à l'échelle territoriale : Cas des interactions entre agriculture et élevage à la Réunion. (Mémoire fin d'études Ingénieur Agronome). Bordeaux Sciences Agro.

Bernoux, M., Schiettecatte, L.-S., Tinlot, M., Bockel, L., Branca, G., 2016. (EX-ACT) Technical Guidelines for Version 7. FAO.

Colomb, V., Bernoux, M., Bockel, L., Chotte, J.-L., Martin, S., Martin-Phipps, C., MOUSSET, J., Tinlot, M., Touchemoulin, O., 2012. Revue des calculateurs GES pour l'agriculture et la forêt. Guide d'aide au choix et à l'utilisation des outils pour les évaluations territoriales. ADEME-FAO-IRD.

Colomb, V, Colomb, Vincent, Martel, M., Guadeloupe, A., 2012. Bilan des émissions de Gaz à Effet de Serre de l'agriculture et la forêt pour le territoire de la Guadeloupe. ADEME-FAO-IRD, Guadeloupe.

Colomb, V., Martin, S., Bernoux, M., Bockel, L., 2013a. Bilan GES "Agriculture à l'Echelle Régionale": comparaison des outils développés par la FAO et l'ADEME. Projet AGER. ADEME-FAO-IRD.

Colomb, V., Touchemoulin, O., Bockel, L., Chotte, J.-L., Martin, S., Tinlot, M., Bernoux, M., 2013b. Selection of appropriate calculators for landscape-scale greenhouse gas assessment for agriculture and forestry. Environmental Research Letters 8, 015029. https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015029

Dupuy, S., 2018. Carte d'occupation du sol 2017 Spot6-7 (niveau 3) - CIRAD — AWARE [WWW Document]. URL http://aware.cirad.fr/layers/geonode%3Aclassif_gabir_2017_postclas_code3_cor (accessed 9.6.19).

FAO, ITPS, 2018. Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Technical Report. Rome.

Grondin, S., 2012. Inventaire régional des émissions de gaz à effet de serre pour l'île de La Réunion en 2010. Résultats et tendances. 72.

IPCC, 2019. Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.

IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 3: Consistent Representation of Lands. Authors: Kathryn Bickel (USA) and Gary Richards (Australia) Michael Köhl (Germany) and Ricardo Leonardo Vianna Rodrigues (Brazil) Contributing Author: Goran Stahl (Sweden). IPCC.

Louis, C., 2013. Rapport d'étude "Bilan Carbone" Territoire du Conseil Général de La Réunion". Conseil Général de La Réunion.

Milne, E., Neufeldt, H., Rosenstock, T., Smalligan, M., Cerri, C.E., Malin, D., Easter, M., Bernoux, M., Ogle, S., Casarim, F., Pearson, T., Bird, D.N., Steglich, E., Ostwald, M., Denef, K., Paustian, K., 2013. Methods for the quantification of GHG emissions at the landscape level for developing countries in smallholder contexts. Environ. Res. Lett. 8, 015019. https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015019

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2010. RGA (Recensement Agricole) - agreste - La statistique, l'évaluation et la prospective agricole - Résultats - Données chiffrées [WWW Document]. URL http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/structure-des-exploitations-964/recensement-agricole-2010/resultats-donnees-chiffrees/ (accessed 10.10.19).

Powers, J.S., Corre, M.D., Twine, T.E., Veldkamp, E., 2011. Geographic bias of field observations of soil carbon stocks with tropical land-use changes precludes spatial extrapolation. Proceedings of the National Academy of Sciences 108, 6318–6322. https://doi.org/10.1073/pnas.1016774108

Smith, P., Soussana, J., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D.P., Batjes, N.H., Egmond, F., McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, J.E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A., Klumpp, K., 2019. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. Glob Change Biol gcb.14815. https://doi.org/10.1111/gcb.14815

Données supplémentaires « Différences de stocks de COS »

UPC	Usage	Stock de COS moyen	Stock de COS moyen	Stock de COS écart-type	Stock de COS écart-type	Δstock de COS moyen	Δstock de COS écart-type	Nb d'échantillons	p-value	% de variation
		Autre usage	Canne à sucre	Autre usage	Canne à sucre			Autre usage		
		(MgC ha-1)	(MgC ha-1)	(MgC ha-1)	(MgC ha-1)	(MgC ha-1)	(MgC ha-1)			
3_TW	Ananas	198	242	61	21	-44	59	67	6,25E-08	-18
7_TD	Maraichage	69	85	21	10	-16	23	45	1,99E-05	-19
9_TD	Maraichage	55	94	21	23	-39	15	6	1,30E-03	-41
5_TW	Ananas	101	125	39	27	-24	26	16	1,83E-03	-20
3_TM	Maraichage	195	251	60	59	-56	73	21	2,26E-03	-22
7_TD	Ananas	71	83	19	13	-12	21	28	5,48E-03	-15
7_TM	Ananas	80	93	28	12	-13	25	32	6,31E-03	-14
2_TW	Ananas	98	120	15	17	-23	11	5	9,38E-03	-19
4_TD	Ananas	138	172	1	0	-34	1	2	1,04E-02	-20
1_TM	Ananas	93	115	29	15	-22	30	15	1,54E-02	-19
5_TM	Ananas	113	154	47	19	-41	49	11	2,00E-02	-27
8_TM	Verger	101	128	23	15	-27	27	8	2,65E-02	-21
3_TM	Prairie	301	235	58	44	66	24	3	4,16E-02	28
1_TM	Maraichage	100	111	26	20	-11	11	6	5,13E-02	-10
9_TD	Verger	63	113	33	18	-50	51	6	5,92E-02	-45
4_TW	Verger	131	162	23	8	-30	22	4	6,94E-02	-19
5_TM	Maraichage	160	173	32	17	-12	35	21	1,21E-01	-7
7_TM	Verger	84	96	20	19	-12	16	6	1,31E-01	-12
6_TM	Ananas	98	106	24	10	-8	21	14	1,79E-01	-8
2_TD	Verger	100	133	42	57	-33	15	2	1,96E-01	-25
8_TD	Maraichage	85	116	6	10	-30	16	2	2,30E-01	-26
7_TD	Verger	93	83	45	14	9	41	27	2,51E-01	11
4_TM	Ananas	117	130	26	33	-13	22	5	2,61E-01	-10
7_TD	Prairie	136	89	93	13	47	97	5	3,37E-01	53
3_TM	Verger	188	203	65	52	-15	76	24	3,39E-01	-7
3_WTM	Verger	144	219	74	7	-75	67	2	3,58E-01	-34
2_TM	Verger	99	87	56	40	13	19	3	3,66E-01	15
3_TW	Maraichage	188	215	77	16	-26	72	7	3,71E-01	-12
2_TD	Maraichage	61	86	54	3	-26	52	4	3,96E-01	-30
8_TD	Verger	139	117	47	16	22	45	4	4,00E-01	19
3_TW	Verger	238	225	92	31	13	89	31	4,14E-01	6
2_TM	Ananas	116	136	96	62	-20	35	3	4,14E-01	-15
4_TM	Verger	112	118	45	22	-6	43	30	4,22E-01	-5
2_TM	Maraichage	106	90	67	84	17	30	3	4,37E-01	18
6_TM	Verger	98	111	37	6	-13	37	6	4,47E-01	-11
2_TW	Verger	114	123	25	4	-9	22	4	4,49E-01	-8
2_TD	Ananas	72	77	5	9	-5	10	3	5,14E-01	-6
6_TM	Maraichage	97	105	19	11	-8	26	5	5,27E-01	-8
3_TM	Ananas	196	220	12	27	-24	40	2	5,53E-01	-11
4_TM	Maraichage	124	131	35	38	-7	41	11	5,60E-01	-6
7_TW	Ananas	106	105	2	0	1	2	2	6,02E-01	1
9_TD	Ananas	76	82	29	10	-5	27	7	6,37E-01	-6
3_TD	Verger	160	142	85	1	18	87	5	6,64E-01	13
5_TM	Verger	154	151	37	24	4	45	27	6,91E-01	2
5_TW	Verger	130	120	55	20	10	47	4	6,91E-01	9
8_TM	Ananas	124	119	28	4	6	24	3	7,08E-01	5
8_TM	Maraichage	105	123	68	1	-18	67	2	7,73E-01	-14
7_TM	Maraichage	84	82	17	10	2	14	4	8,29E-01	2
4_TD	Maraichage	172	174	37	5	-2	35	8	8,61E-01	-1
8_TD	Ananas	111	106	54	30	5	63	3	9,10E-01	4
1_TM	Verger	108	109	29	14	-1	28	7	9,49E-01	-1

Données supplémentaires « Paramétrage EX-ACT »

MODULE Land Use Change

Les biomasses aériennes totales de l'ananas et du maraichage ont été évaluées à 10 tC ha^{-1} et 1 tC ha^{-1} respectivement, à dire d'expert. L'estimation de la biomasse totale de la canne à sucre a été estimée à 21tC ha^{-1}. La valeur par défaut d'EX-ACT a été conservée pour l'arboriculture. Pour les prairies, la biomasse aérienne totale a été évaluée à 12.5 tC ha^{-1} pour les méthodes « Globale » et « Totale » ainsi que pour toutes les UPC excepté pour l'unité pédoclimatique « 3_TM » dont les rendements des prairies d'altitude sont estimés à 12 tMS ha^{-1}, la biomasse a donc été estimée à 6 tC ha^{-1}, à dire d'expert.

MODULE Cropland / Grassland

Les surfaces, exprimées en hectare, sont issues de la carte d'occupation du sol 2017 de La Réunion (Dupuy, 2017).

UPC	Ananas	Canne	Maraichage	Prairie	Verger	par UPC
1_TM	73	1 503	145	248	321	2 290
2_TW	5	565			100	669
3_TM		1 310	724	2 896	1 650	6 579
3_TW	99	4 756	85		1 387	6 328
5_TM	30	1 651	299	701	980	3 660
5_TW	9	1 048			328	1 385
7_TD	84	3 166	572	329	1 549	5 700
7_TM	63	3 205	248	217	684	4 417
8_TM	4	452			91	546
9_TD	26	593	131		485	1 235
Globale/∑UPC	391	18 247	2 204	4 391	7 575	32 809

D'autre part, pour le scénario "Gol" simulant une disparition des surfaces en canne à sucre du Sud et de l'Ouest de l'île, pour lesquelles la canne récoltée est transformée à l'usine du Gol, les surfaces reliées à chacune des usines doivent être calculées. Un pourcentage de conversion des surfaces pour chaque unité pédoclimatique est alors estimé dans le tableau suivant.

UPC	BOIS ROUGE	GOL	Total	% conversion
1_TM	1 164	339	1 503	22,55
2_TW	565		565	0,00
3_TM	46	1 264	1 310	96,50
3_TW	4 244	512	4 756	10,77
5_TM	665	986	1 651	59,74
5_TW	785	263	1 048	25,10
7_TD	346	2820	3 166	89,07
7_TM	1 519	1 685	3 205	52,59
8_TM		452	452	100,00
9_TD		593	593	100,00
Globale/∑UPC	9 333	8 914	18 247	48,85

MODULE Grassland Livestock

Les effectifs animaux (en nombre de têtes) ont été estimés et réévalués à partir du RGA, 2010 (Allo and Vigne, 2015) pour la méthode « Totale ». Ces effectifs ont ensuite été géolocalisés grâce à une couche d'information géographique des bâtiments d'élevage (DAAF La Réunion, 2012). Pour chaque

catégorie d'animaux, les effectifs de la commune ont été affectés aux bâtiments d'élevage, chaque bâtiment comprend le même nombre d'animaux. Seuls les effectifs des vaches laitières étaient disponibles avec une géolocalisation.

Unité pédoclimatique	Vaches laitières	Autres bovins	Chèvres	Moutons	Suidés de marché	Suidés de reproduction	Volailles
1_TM	20	0	235	0	980	108	6 117
2_TW	0	26	0	0	448	41	4 341
3_TM	595	5 709	1 778	143	9 787	1 064	280 029
3_TW	53	536	941	54	3 788	480	178 233
5_TM	293	2 038	2 927	0	5 813	598	37 143
5_TW	33	438	392	0	4 637	475	115 319
7_TD	17	1 166	6 313	131	10 360	1 298	267 111
7_TM	0	1 497	918	0	3 464	316	117 533
8_TM	0	856	1 296	0	490	54	0
9_TD	0	0	0	0	766	74	5 740
Globale/∑UPC	1 011	12 266	14 800	328	40 533	4 508	1 011 566

Si les animaux élevés en bâtiment tels que les suidés et les volailles sont probablement bien répartis sur le territoire selon cette méthode, quelques limites doivent être soulignées pour les autres catégories. Les caprins et ovins ont été considérés comme étant élevés dans des bâtiments d'élevage. A La Réunion, les bovins allaitants en pâturage n'ont généralement pas ou peu de bâtiments qui leur sont dédiés, entrainant un biais de la répartition des effectifs « autres bovins » selon la méthode utilisée. Les équins n'ont pas été pris en compte dans nos calculs.

Les émissions de méthane liées à l'activité biologique du bétail ont été renseignées avec des valeurs issues du bilan Energie et GES à La Réunion (Thévenot et al., 2011).

Bétail	Fermentation entérique (kgCH4/animal/an)	Déjections (stockage, travail, apport) (kgCH4/animal/an)
Vaches laitières	106.44	13.83
Autres bovins	42.49	3.48
Chèvres	9.48	0.16
Moutons (valeur par défaut Ex-Act)	5	0.15
Suidés de marché	1.03	3.47
Suidés de reproduction	1.03	3.47
Volailles	0.07	0.56

Les émissions de protoxyde d'azote (N2O) du fumier ont également été renseignées avec les valeurs issues du bilan Energie et GES à La Réunion (Thévenot et al., 2011).

Facteur d'émission de N2O du fumier (kg N-N2O/kg N)	
Pâturage, champs, enclos	0.03
Autre	0.03

MODULE Inputs

Canne à sucre

Les quantités d'intrants considérées pour la canne à sucre sont les intrants conseillés selon le système expert réunionnais d'aide à la fertilisation (SERDAF). Les modules de ce système expert ont été reconstitués pour définir le conseil sur le jeu de données ayant servi à la définition des unités pédologiques. Seul le conseil pour la repousse a été considéré, et moyenné sur une durée de plantation

de 7 ans. Pour la fertilisation azotée, l'hypothèse a été faite que tout l'apport d'azote se fait sous forme uréique d'après expertise. Les données sont exprimées en t ha^{-1} an^{-1}.

Cependant, dans les pratiques, le conseil SERDAF n'est que très peu suivi et un cycle de plantation est de 10 ans en moyenne. Pour le chaulage, le conseil SERDAF préconisant des quantités de Ca Mg ou Ca, l'apport de dolomie et calcaire a été théorisé afin de correspondre aux catégories Ex-Act bien que les pratiques des systèmes canniers réunionnais n'utilisent que très peu ce type de produit chaulant. De plus, à la Réunion, les apports en Ca et Mg ne se font qu'à la replantation (1 fois sur 7 ans) et dans la limite de 2t chaux (équivalent à 4.25 t de calcaire) et 4t de dolomie d'après le guide de la fertilisation de la canne à sucre à La Réunion (Fillols and Chabalier, 2007). Le conseil en produit chaulant a été considéré uniquement dans les cas où plus de 10% des analyses de sol étaient concernées par un conseil en chaulage. Aucun chaulage n'a été renseigné pour les méthodes « Globale » et « Totale ».

UPC	Urée t ha^{-1} an^{-1}	P2O5 t ha^{-1} an^{-1}	K2O t ha^{-1} an^{-1}	Calcaire t ha^{-1} an^{-1}	Dolomie t ha^{-1} an^{-1}
1_TM	0,328	0,109	0,307		0,571
2_TW	0,303	0,095	0,277		
3_TM	0,262	0,106	0,331		0,571
3_TW	0,255	0,111	0,316	0,464	
5_TM	0,314	0,116	0,306		0,571
5_TW	0,302	0,091	0,311		0,571
7_TD	0,322	0,088	0,204		
7_TM	0,326	0,095	0,198	0,607	0,571
8_TM	0,292	0,018	0,151		
9_TD	0,327	0,065	0,205		
Globale/∑UPC	0,303	0,095	0,255		

D'après (Martin et al., 2016), les herbicides apportés sur canne à sucre représentent 98% du poids des QSA (Quantité de Substance Active) herbicides de La Réunion. Les pesticides sur canne ont donc été considérés comme étant à 100% des herbicides. Selon cette hypothèse, les autres modes d'usages ne reçoivent aucun herbicide. La quantité totale d'herbicides estimées par (Martin et al., 2016) sur canne à sucre a été divisée uniformément sur la surface cannière et représente 5.90 kg de substance active par hectare et par an. Cependant, certaines quantités de substance active n'étant pas renseignées dans le document de Martin et al. (2016), ces types d'herbicides n'ont pas été pris en compte dans le calcul.

Ananas

Pour la culture de l'Ananas, les doses conseillées en NPK ont été considérées comme étant les quantités apportées. Les doses conseillées et les pratiques sont issues d'une fiche technique de l'ananas Victoria (CIRAD and Chambre d'agriculture Réunion, 2015), des conseils en fertilisation du logiciel Ferti-RUN (Chambre d'agriculture Réunion and CIRAD, 2008) et d'une étude des pratiques agricoles de la production d'Ananas (Fournier and Cambournac, 2013). Les doses conseillées sont de l'ordre de 300 kg N ha^{-1} $cycle^{-1}$ et 450 kg K ha^{-1} $cycle^{-1}$. A La Réunion, selon Fournier and Cambournac (2013), la moitié des exploitants apporte un engrais binaire tandis que l'autre moitié des exploitants apporte l'azote sous forme d'urée et le potassium sous forme de sulfate de potasse. Cependant, bien que le cycle de l'ananas varie entre 12 et 18 mois selon l'altitude de la culture, le cycle a été considéré comme étant de 1 an sur l'ensemble de l'île. Aucune information n'étant disponible à notre connaissance sur les pratiques de chaulage pour la culture de l'ananas, aucun chaulage n'a été renseigné. Concernant les pesticides, l'hypothèse a été faite qu'aucun pesticide n'est apporté sur ananas à La Réunion. En effet, tous les herbicides sont considérés comme apportés en totalité sur canne à sucre, aucun insecticide n'est homologué pour l'ananas et seul 2-3% des fongicides totaux à La Réunion seraient appliqués sur ananas à dire d'expert. Toutes les quantités d'intrants sont renseignées de manière identique pour toutes les unités pédoclimatiques.

Intrants (ananas)	
Apport dolomie t ha-1 an-1	0
Apport calcaire t ha-1 an-1	0
Apport Urée t ha-1 an-1	0.123
Autre engrais N t ha-1 an-1	0.120
P2O5 t ha-1 an-1	0.025
K2O t ha-1 an-1	0.450
Boues tN ha-1	0
Compost tN ha-1	0.069
Autre chaulage t ha-1 an-1	0
Herbicides t matiere active an-1 ha-1	0
Insecticides t matiere active an-1 ha-1	0
Fongicides t matiere active an-1 ha-1	0

Maraichage

Pour le maraichage, étant donné la diversité des pratiques et des différences liées aux types de cultures, une méthodologie basée sur des doses conseillées ne semblait pas envisageable. Les quantités de fertilisants ont donc été déduits d'une enquête statistique de la DAAF auprès de 500 producteurs maraichers à La Réunion sur la culture des légumes (carotte, chou, salade, tomate) (DAAF La Réunion, 2016). Des doses moyennes apportées par cycle ont été prises en compte pour fertilisation minérale. Pour les apports organiques, seule la dose moyenne d'azote apportée de 65 kg N ha^{-1} $cycle^{-1}$ étant indiquée, les doses de P et K ont été estimées à partir des caractéristiques agronomiques des matières organiques les plus utilisées (fumier de bovin, écumes de sucrerie et fumier de volailles de chair) (DAAF La Réunion, 2016) et de leur coefficient équivalent-engrais (Chambre d'agriculture Réunion and CIRAD, 2008). Afin de prendre en compte la rotation des cultures, deux cycles ont été considérés en moyenne sur une année (Chabalier et al., 2006). Etant donné que la pratique de chaulage sur le maraichage ne concerne que 4% des surfaces à La Réunion (DAAF La Réunion, 2016), l'hypothèse a été faite qu'aucun chaulage est réalisé sur les surfaces en maraichage de La Réunion. Concernant les pesticides, l'hypothèse a été faite qu'aucun herbicide n'est apporté sur maraichage à La Réunion car apportés en totalité sur canne à sucre. A dire d'expert, 70% en moyenne des insecticides et des fongicides vendus à La Réunion seraient appliqués sur maraichage. La répartition de l'utilisation des insecticides et fongicides sur maraichage a été estimé à 50% chacun, c'est-à-dire 1.59 kg de substance active par hectare et par an.

Toutes les quantités d'intrants sont renseignées de manière identique pour toutes les unités pédoclimatiques.

Intrants (maraîchage)	
Apport dolomie t ha-1 an-1	0
Apport calcaire t ha-1 an-1	0
Apport Urée t ha-1 an-1	0.000
Autre engrais N t ha-1 an-1	0.150
P2O5 t ha-1 an-1	0.644
K2O t ha-1 an-1	0.599
Boues tN ha-1	0.000
Compost tN ha-1	0.130
Autre chaulage t ha-1 an-1	0
Herbicides t matiere active an-1 ha-1	0
Insecticides t matiere active an-1 ha-1	0.00159
Fongicides t matiere active an-1 ha-1	0.00159

Arboriculture

La fertilisation en NPK pour l'arboriculture a été raisonnée en fonction des doses conseillées en NPK pour la culture des agrumes uniquement (Chambre d'agriculture Réunion and CIRAD, 2008) ; les autres vergers (letchis et manguiers) ne recevant pas de fertilisation. Les surfaces d'agrumes étant différentes selon les unités pédoclimatiques, les apports en NPK ont été calculés pour les surfaces d'agrumes pour chaque unité pédoclimatique et ramené à la surface totale de l'arboriculture de l'unité pédoclimatique. Le même calcul a ensuite été appliqué aux surfaces des 10 unités pédoclimatiques ou les surfaces totales pour les méthodes « Globale » et « Totale ». Aucune information n'étant disponible à notre connaissance sur les pratiques de chaulage pour les vergers, aucun chaulage n'a été renseigné.

UPC	Autre engrais N t ha-1 an-1	P2O5 t ha-1 an-1	K2O t ha-1 an-1
1_TM	0,318	0,074	0,318
2_TW	0,012	0,003	0,012
3_TM	0,379	0,089	0,379
3_TW	0,108	0,025	0,108
5_TM	0,388	0,090	0,388
5_TW	0,187	0,044	0,187
7_TD	0,195	0,046	0,195
7_TM	0,295	0,069	0,295
8_TM	0,396	0,092	0,396
9_TD	0,033	0,008	0,033
Globale/∑UPC	0,248	0,058	0,248

Concernant les pesticides, l'hypothèse a été faite qu'aucun pesticide n'est apporté sur arboriculture à La Réunion car apportés en totalité sur canne à sucre. Selon expertise, 30 % en moyenne des insecticides et des fongicides vendus à La Réunion seraient appliqués sur arboriculture. La répartition de l'utilisation des insecticides et fongicides sur maraichage a été estimé à 90 et 10% respectivement, ce qui équivaut à 1.23 kg de substance active par hectare et par an pour les insecticides et 0.14 kg de substance active par hectare et par an pour les fongicides. Toutes les quantités de pesticides sont renseignées de manière identique pour toutes les unités pédoclimatiques.

Prairie

Pour les prairies, les doses conseillées en NPK ont été considérées comme étant les quantités apportées. Le conseil utilisé est celui indiqué dans le guide technique des prairies à La Réunion (Barbet-Massin et al., 2004), soit 342 kg N ha^{-1} an^{-1}, 235 kg P ha^{-1} an^{-1} et 144 kg K ha^{-1} an^{-1}. Ce conseil étant préconisé à la fois pour une prairie avec un rendement annuel de 12tMS ha^{-1} (correspondant aux prairies des Hauts) ou une prairie de fauche (7/9 coupes par an) correspondant aux prairies des Bas, cela permet de ne pas différencier les prairies fauchées des Bas, cultivées principalement en Chloris et les prairies fauchées des Hauts qui regroupent des espèces tropicales et tempérées et dont les rendements sont inférieurs. Cependant, la distinction a été faite entre les prairies de pâturage qui n'ont aucun amendement organique ou engrais chimique autres que les effluents des animaux. Pour les prairies de fauche, un cas particulier a été considéré d'après expertise. La répartition entre les engrais chimiques et les amendements organiques pour l'azote ne concerne que l'unité pédoclimatique « 3_TM » dont la conduite des élevages laitiers de la zone permet de répartir les 342 kg N ha^{-1} an^{-1} entre 90 kg N ha^{-1} an^{-1} d'azote minéral et 252 kg N ha^{-1} an^{-1} d'azote apporté par du lisier de bovin. Les surfaces de prairies pâturées et fauchées étant différentes selon les unités pédoclimatiques, les apports en NPK ont été calculés pour les surfaces fauchées pour chaque unité pédoclimatique et ramenés à la surface totale des prairies de l'unité pédoclimatique. Le même calcul a ensuite été appliqué aux surfaces des 10 unités pédoclimatiques ou les surfaces totales pour les

méthodes « Globale » et « Totale ». Cependant, dans la pratique, les doses conseillées ne sont probablement que très peu suivies. La fertilisation en NPK des prairies de fauche des Bas semble bien plus importante que les quantités indiquées dans nos calculs. Aucune information n'étant disponible à notre connaissance sur les pratiques de chaulage, aucun chaulage n'a été renseigné. Concernant les pesticides, l'hypothèse a été faite qu'aucun pesticide est apporté sur prairie à La Réunion.

UPC	Autre engrais N t ha-1 an-1	Compost tN ha^{-1} an^{-1}	P2O5 t ha-1 an-1	K2O t ha-1 an-1
1_TM	0,121		0,083	0,051
2_TW				
3_TM	0,046	0,016	0,043	0,026
3_TW				
5_TM	0,066		0,045	0,028
5_TW				
7_TD	0,247		0,169	0,104
7_TM	0,167		0,115	0,070
8_TM				
9_TD				
Globale/∑UPC	0,085		0,058	0,036

Références

Allo, M., Vigne, M., 2015. Estimations des productions et des besoins de biomasse d'origine agricole à l'échelle territoriale : Cas des interactions entre agriculture et élevage à la Réunion. (Mémoire fin d'études Ingénieur Agronome). Bordeaux Sciences Agro.

Barbet-Massin, V., Grimaud, P., Michon, A., Thomas, P., 2004. Guide technique pour la création, la gestion et la valorisation des prairies à la Réunion.

Chabalier, P.-F., van de Kerchove, V., Saint Macary, H., 2006. Guide de la fertilisation organique à La Réunion. CIRAD.

Chambre d'agriculture Réunion, CIRAD, R., 2008. Manuel de l'utilisateur Ferti-RUN 2008.

CIRAD, R., Chambre d'agriculture Réunion, 2015. Fiche technique de l'Ananas.

DAAF La Réunion, 2016. Agreste, numéro100. La culture des légumes : chou, carotte, salade, tomate. Premiers résultats de l'enquête statistique réalisée en 2014 auprès de 500 producteurs maraîchers à La Réunion.

DAAF La Réunion, 2012. Elements descriptifs des exploitations agricoles - 06/2012 [WWW Document]. URL http://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/Telechargement-donnees-SIG (accessed 3.1.19).

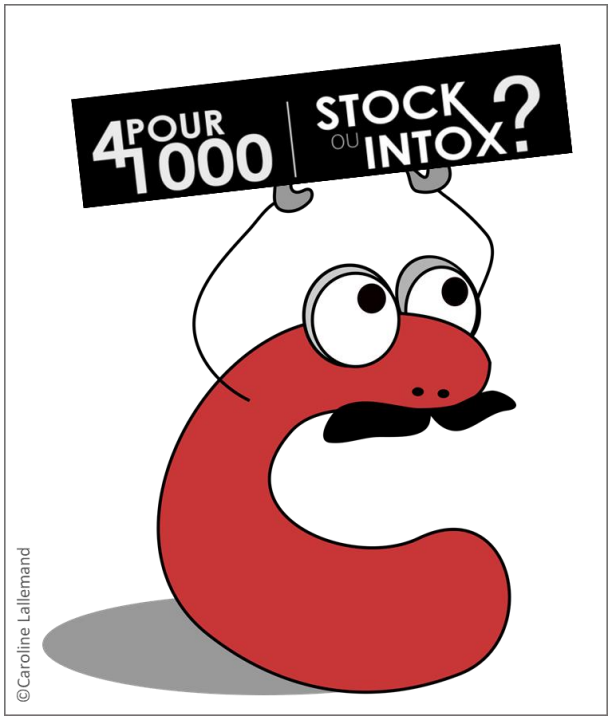
Dupuy, S., 2017. Fiche complémentaire de la couche « Carte d'occupation du sol 2017 à la Réunion » 9.

Fillols, E., Chabalier, P.-F., 2007. Guide de la fertilisation de la canne à sucre à La Réunion. CIRAD.

Fournier, P., Cambournac, T., 2013. Bilan des exploitations enquêtées 60.

Martin, J., Maillary, L., Dutripon, S., Chaulet, G., Antoir, J., Masson, J., 2016. AFPP– 23e conférence du COLUMA. Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. Dijon – 6, 7 et 8 décembre 2016 l'IFT herbicides canne à sucre à La Réunion : la baisse semble amorcée. 11.

CHAPITRE 6



CHAPITRE 6. DISCUSSION GENERALE

Ce travail de thèse a pour enjeu principal d'utiliser une base de données d'analyses de sol préexistante dans un milieu volcanique tropical spatialement hétérogène afin de répondre à quatre questions scientifiques :

1) Comment mesurer les stocks de COS de manière rapide, non destructive et peu coûteuse ?
2) Comment quantifier les stocks de COS des sols agricoles ?
3) Comment évaluer les variations de stocks de COS selon des changements d'usages des terres agricoles ?
4) Comment estimer les bilans de GES selon des scénarios de changements d'usages des terres agricoles à l'échelle de ce territoire ?

Les principaux résultats, et détaillés dans les chapitres de ce manuscrit, sont présentés dans la Figure 6.1. L'approche spatiale et les données utilisées sont schématisées dans les 4 encadrés au centre tandis que les principaux résultats obtenus à partir des méthodologies employées sont résumés sous la forme de figures illustratives.

Ce dernier chapitre a pour objectif de synthétiser les différents résultats obtenus afin de les discuter en montrant leurs limites et les problématiques qu'ils soulèvent. Face à ces problématiques, des méthodologies sont ensuite proposées pour améliorer les mesures et le suivi des stocks de COS. Enfin, ces résultats sont replacés dans le contexte de l'initiative 4p1000 afin de discuter du potentiel de stockage du carbone organique dans les sols agricoles de La Réunion et d'envisager des perspectives agronomiques et scientifiques.

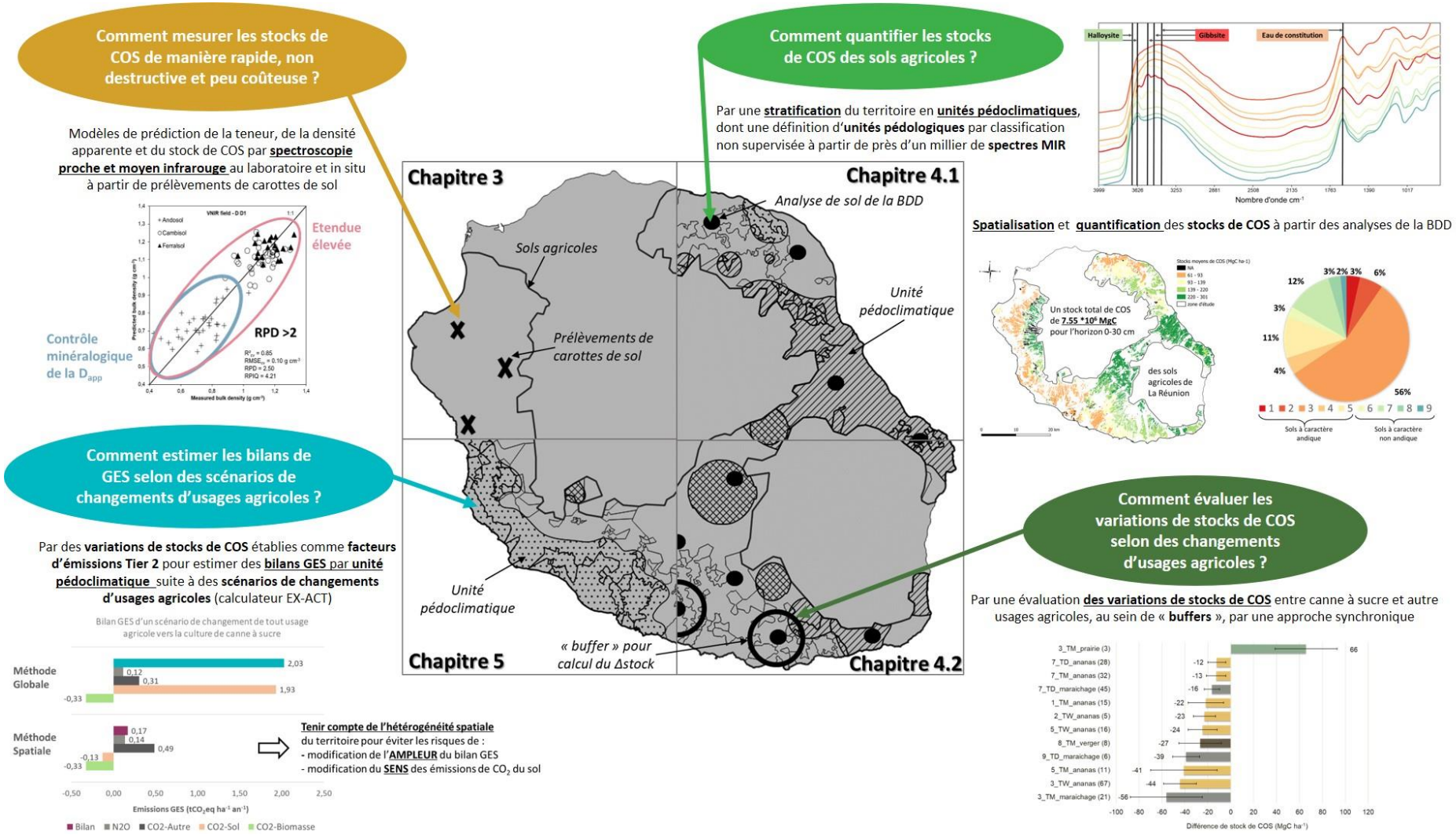


FIGURE 6.1 : SCHEMA DE SYNTHESE DE LA METHODOLOGIQUE EMPLOYEE ET DES PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS POUR REPONDRE AUX OBJECTIFS DE LA THESE

6.1 Synthèse des résultats obtenus et mise en perspective

6.1.1 Méthodologie d'estimation du stock de COS par spectroscopie proche et moyen infrarouge

L'évaluation du stock de COS est un défi méthodologique pour le suivi du COS à l'échelle régionale. La spectroscopie infrarouge est apparue comme un outil prometteur pour résoudre ce problème méthodologique dans les sols volcaniques tropicaux de La Réunion (cf. chapitre 3). Avec des indicateurs RPD supérieurs à 2, les modèles de prédictions des teneurs en COS, de la densité apparente du sol et du stock de COS ont montré des performances tout à fait satisfaisantes, à la fois sur des échantillons de sol frais 'in situ' par spectroscopie PIR et sur des échantillons séchés, tamisés et/ou broyés au laboratoire. Cette capacité inattendue de prédire directement le stock de COS par spectroscopie infrarouge s'explique en partie par des teneurs élevées en COS couplées à une grande variabilité des teneurs en COS et de la densité apparente, fournissant une large gamme pour ces variables, et donc une prédiction plus précise. Cependant, ces résultats questionnent les déterminants sous-jacents de la densité apparente et du stock de COS, paramètres physiques supposés être très difficilement prédictibles par spectroscopie infrarouge. Or, des analyses des produits amorphes (Alo, Feo, Sio, Alp, Fep) ont été réalisées sur tous les échantillons de sol. Les analyses des spectres moyens et des coefficients de régression, combinés aux modèles de prédiction des produits amorphes par spectroscopie infrarouge ont démontré que les produits amorphes, détectés dans les spectres, étaient les déterminants des prédictions du stock de COS par spectroscopie infrarouge. La présence des produits amorphes (notamment des allophanes) couplée à une gamme élevée de variations des paramètres (teneur en COS, densité apparente) du stock de COS semblent être les deux facteurs principaux expliquant la qualité de la prédiction. Dans ce type de contexte pédologique, la possibilité de prédire des stocks de COS par spectroscopie infrarouge et notamment par spectroscopie proche infrarouge directement sur des échantillons de sol frais sur le terrain est une perspective intéressante d'un point de vue scientifique et technique. La spectroscopie à réflectance diffuse proche et moyen infrarouge apparait comme un outil approprié, rapide, peu coûteux et non destructif, pour étudier les stocks de COS dans les sols volcaniques tropicaux et pour mettre en place des systèmes de mesure du stock de COS à une échelle régionale.

Cependant, bien que ces résultats semblent prometteurs pour la prédiction du stock de COS à partir de spectres proche et moyen infrarouge de sols volcaniques tropicaux, ces modèles basés sur seulement 95 échantillons provenant de 11 sites de prélèvements et deux modes d'usages (canne à sucre et prairie), restent des résultats préliminaires.

6.1.1.1 Des mesures de terrain complémentaires des stocks de COS et des acquisitions spectrales en proche et moyen infrarouge au laboratoire et in situ

Des données supplémentaires pour permettre une validation externe des résultats seront nécessaires afin de confirmer ou d'infirmer ces premiers résultats et d'établir d'éventuels nouveaux modèles de prédiction du stock de COS plus robustes. Pour cette raison, des mesures ont également été réalisées sur 9 autres sites en 2016, principalement sous culture de canne à sucre, pour un total de 20 sites de prélèvements pour l'ensemble de l'année 2016. Durant cette thèse, deux campagnes supplémentaires de prélèvements de carottes de sol ont été réalisées en 2017 et 2018 sur 24 sites (Figure 6.2), principalement pour des modes d'usages de maraichage et ananas en 2017 et prairie en 2018. L'objectif était de compléter les mesures de stocks de COS et des acquisitions spectrales en proche sur le terrain et en proche et moyen infrarouge au laboratoire sur l'ensemble des unités pédologiques,

climatiques et des modes d'usages agricoles de La Réunion. Bien que l'analyse de toutes ces données n'ait pas été réalisée pendant la thèse, elles pourraient permettre de calibrer des modèles de prédiction de stocks de COS par spectroscopie proche et moyen infrarouge au laboratoire et sur le terrain afin d'en améliorer la robustesse.

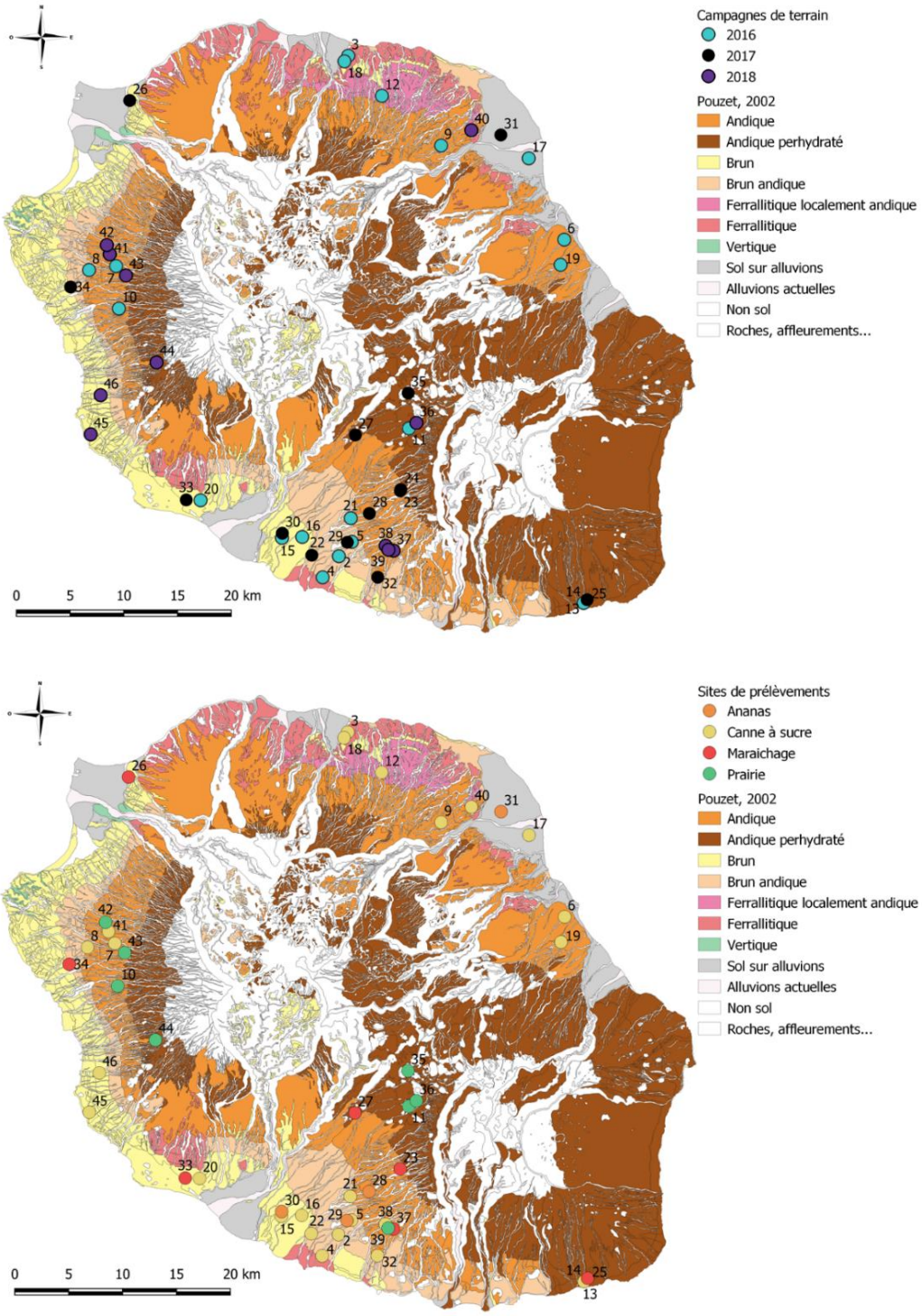


FIGURE 6.2 : CARTOGRAPHIE DES SITES DE PRELEVEMENTS REALISES PENDANT LES CAMPAGNES DE TERRAIN REALISEES EN 2016 ET PENDANT LA THESE EN 2017 ET 2018

D'autre part et sachant qu'une méthodologie d'acquisition spectrale en MIR directement sur les carottes de sol nécessite encore d'être développée dans le futur à La Réunion, ces données peuvent peut-être apporter également d'autres réponses d'ordre méthodologique. En effet, le fait d'avoir multiplié les types d'acquisition en proche et moyen infrarouge, sur des échantillons de sol séchés, tamisés (VNIR) et /ou broyés (MIR) en laboratoire ou bien directement sur les carottes de sol sur le terrain (VNIR) pourrait être également analysé dans le but de déterminer quelle serait la méthode la plus adaptée pour estimer le stock de COS selon le but recherché (une méthode simple et rapide d'un point de vue technique, une méthode plus précise en laboratoire, etc…).

Pour aller plus loin, après cette première étape de calibration de modèles de prédiction des stocks de COS par spectroscopie infrarouge, ces données pourraient également constituer le début d'une librairie spectrale en proche et moyen infrarouge qui, une fois étoffée d'autres spectres infrarouge acquis en routine soit au laboratoire du CIRAD soit directement sur le terrain, pourrait ainsi permettre de mesurer et suivre dans le temps et l'espace (« monitoring »), de manière fiable et à bas coûts les stocks de COS à l'échelle de La Réunion.

6.1.1.2 Un taux d'éléments grossiers à prendre en compte dans le calcul du stock de COS

D'autre part, dans ce travail de thèse, les stocks de COS calculés (hors stocks issus des données du chapitre 3) ne prennent pas en compte les éléments grossiers. Ce facteur, pourtant fondamental et pouvant entrainer des erreurs importantes dans l'estimation des stocks de COS, reste une forte limite méthodologique lorsque l'on travaille à des échelles plus grandes que celle de la parcelle.

6.1.2 Quantification des stocks de COS des sols agricoles

Afin de cartographier et quantifier les stocks de COS des sols agricoles de La Réunion, une méthodologie de stratification du territoire en unités pédoclimatiques a été développée (cf. Chapitre 4). Une classification non supervisée à partir de 962 spectres MIR a permis de définir des « unités pédologiques spectrales » basées sur des informations minéralogiques et organiques. Les modèles de prédiction des densités apparentes (Allo et al., 2020) ont permis de prédire la densité des 962 échantillons de sol. La densité apparente moyenne a été affectée à chaque unité pédologique. Le stock de COS, pour les 30 premiers cm du sol, a été calculé pour chaque échantillon de sol de la base de données à partir de la teneur en COS issue de l'analyse de sol et de la valeur de la densité apparente de l'unité pédologique de l'échantillon. Des stocks de COS moyens par unité pédoclimatique et par mode d'usage ont ensuite été calculés. Le découpage du territoire selon les unités pédoclimatiques et la carte des usages agricoles, a ensuite permis d'affecter à chaque unité surfacique le stock de COS moyen de l'unité pédoclimatique et mode d'usage correspondant. Cette méthodologie a permis de quantifier le stock de COS total des sols agricoles de La Réunion pour l'horizon 0-30 cm (7.6 MtC) dont 76 % correspond au stock de COS des sols à caractère andique. La spectroscopie moyen infrarouge, couplée à une classification non supervisée, a ainsi montré sa pertinence pour définir des unités pédologiques contenant des informations minéralogique et organique distinctes le long d'un gradient d'altération liée à la pédogenèse en zone volcanique tropicale de La Réunion ainsi que pour calculer des stocks de COS à l'échelle territoriale.

6.1.2.1 Définition des unités pédologiques spectrales

La définition des unités pédologiques, élaborée à partir d'information spectrale moyen infrarouge, a été initiée par l'observation d'une incohérence pédologique (teneurs en COS en inadéquation avec les

types de sol) et d'une complexité de la carte morpho-pédologique existante des sols de La Réunion. Leur cartographie a été permise grâce à la géolocalisation des échantillons de sol de la BBD à partir desquels ont été acquis les spectres MIR en plus de l'extraction des analyses de sol correspondantes dans la BDD. Le choix de la spectroscopie MIR en particulier s'est basé sur le fait que l'information minéralogique du sol, pouvant permettre de différencier les grands types de sols de La Réunion, est mieux détectée dans le moyen infrarouge que dans le proche infrarouge. Le choix de la méthode de classification utilisée a été fait de manière empirique en testant différents algorithmes et en évaluant les résultats par une expertise pédologique. Cette expertise pédologique s'est fondée sur plusieurs outils, allant des travaux de recherches précédents qu'ils soient cartographiques ou minéralogiques (cf. chapitre 2) à de nouvelles analyses. En effet, des analyses de diffraction aux Rayons X (DRX) sur une centaine d'échantillons issus de la pédothèque du CIRAD (Figure 2.12) a permis de spatialiser plus précisément l'information minéralogique des sols agricoles de La Réunion. Cependant, des critiques pourraient être formulées étant donné l'absence d'incertitude associée à cette cartographie.

6.1.2.2 Spatialisation et cartographie des stocks de COS à La Réunion

Le choix a été fait de calculer des stocks de COS moyens par unité pédoclimatique et par mode d'usage en raison de la stratification du territoire élaborée à partir de l'identification des déterminants du carbone organique du sol (type de sol, climat) grâce à l'exploration de la BBD d'analyses de sol de La Réunion. Cependant, d'autres méthodes auraient pu être choisies, les réaliser pourraient être un moyen de comparer les méthodes entre elles afin d'évaluer les différences obtenues en plus des incertitudes liées à chaque méthode. A titre indicatif, et en raison des données disponibles (analyses de sol de la BDD, cartographies de variables qualitatives et quantitatives, mesures de stocks de COS issues des prélèvements par carottes de sol sur le terrain), des méthodes de cartographie numérique (« Digital Soil Mapping » (DSM) en anglais) telles que des méthodes géostatistiques (par ex : krigeage) ou des méthodes d'apprentissage automatique (« machine learning »), avec quantification et propagation des incertitudes liées, pourraient être envisagées afin de préciser la fiabilité des cartographies du stock de COS des sols agricoles de La Réunion.

D'autre part, la télédétection est une technique de plus en plus utilisée pour cartographier les teneurs en COS des horizons de surfaces. Les images satellitaires (notamment celles du programme européen Copernicus (Sentinel-1 pour le radar ou Sentinel-2 pour l'optique)) semblent pouvoir offrir de nouvelles potentialités pour un suivi spatial et temporel du carbone organique du sol. Cependant, cette technique nécessite d'obtenir des images pour des sols nus ou faiblement couverts de végétation.

6.1.2.3 Quantification des stocks de COS des horizons profonds

Les stocks de COS dans cette étude ont été évalués pour les 30 premiers cm du sol, tel que le préconise les lignes directrices du GIEC, mais notamment en raison des données disponibles dans la BDD d'analyses de sol de La Réunion dont la majorité des prélèvements de sol correspondaient à l'horizon 0-30 cm. L'absence de mesure du stock de COS pour les horizons supérieurs à 30 cm est une limite méthodologique liée à la BDD utilisée. Dans le cadre des mesures de stock de COS réalisées sur le terrain, l'utilisation de deux gouges de 50 et 100 cm à l'aide d'un carottier thermique est possible afin de mesurer le stock de COS à des profondeurs supérieures à 30 cm et jusqu'à un mètre de profondeur lorsque la profondeur du sol le permet.

6.1.3 Évaluation des variations de stocks de COS entre modes d'usages agricoles

Dans cette étude (cf. chapitres 4 et 5), les variations du stock de COS à La Réunion entre la culture de la canne à sucre et les autres modes d'usages agricoles ont été évaluées par unité pédoclimatique à partir des données de la BDD d'analyses de sol de La Réunion. Les résultats montrent des différences importantes majoritairement entre le stock de COS de la canne à sucre et le stock de COS du maraichage ou de la culture de l'ananas. Ces variations de stocks de COS liées à des changements d'usages des sols agricoles indiquent que les sols agricoles de La Réunion sont vulnérables aux changements d'usages agricoles, avec un déstockage de COS, toutes unités pédologiques et tous usages confondus, allant de -14 à -41 % du stock initial de COS sous canne à sucre.

6.1.3.1 Un besoin d'analyses de sol supplémentaires pour les autres modes d'usages que la canne à sucre

La principale limite de la méthodologie employée est le biais d'échantillonnage lié à la sur-représentation des échantillons de sol sous canne à sucre (notamment en raison d'une obligation règlementaire européenne pour pouvoir bénéficier d'une subvention à la replantation) et à l'inverse la sous-représentation des autres usages agricoles. Cette sous-représentation, couplée à l'hétérogénéité spatiale du stock de COS au sein de l'unité pédoclimatique, a nécessité d'adapter la méthodologie de comparaison des stocks de COS sous culture de canne à sucre et sous d'autres modes usages agricoles en utilisant des zones tampons (« buffers ») au sein desquelles les stocks de COS ont été comparées. A noter que cette démarche est comparable à des mesures sur le terrain des stocks de COS sur des parcelles voisines d'usages différents. La différence de stock de COS moyenne entre usages agricoles a ensuite été considérée comme caractéristique de l'unité pédoclimatique dans son ensemble pour le calcul des stocks de COS par mode d'usage agricole en tant que facteurs d'émissions Tier 2. Cependant, le faible nombre d'échantillons d'autres modes d'usages agricoles que la canne à sucre utilisés pour évaluer les variations de stock de COS implique la nécessité de relativiser les résultats obtenus. Afin d'améliorer la fiabilité des résultats et de pouvoir les généraliser, un nombre suffisant d'échantillons de sols pour chaque usage serait nécessaire. Une nouvelle base de données adaptée, plus équilibrée c'est-à-dire complétée par de nouvelles analyses de sol pour les autres modes d'usages agricoles que la canne à sucre, permettrait de mieux appréhender l'hétérogénéité spatiale du COS qui reste forte au sein des unités pédoclimatiques et de renseigner de manière plus fiable les variations de stocks de COS dues aux changements d'usages des sols pour l'ensemble des combinaisons unités pédoclimatiques x changements d'usages des sols agricoles de La Réunion.

6.1.3.2 Un besoin de mesures sur le terrain pour évaluer les variations de stock de COS dues aux changements d'usages

Tel que décrit dans le paragraphe précédent, les impacts des changements d'usage sur les stocks de carbone organique du sol ont été évalués en synchronie et non en diachronie. Le choix d'une approche en synchronie s'est basé sur l'hypothèse selon laquelle le stock de carbone du sol sous canne à sucre est considéré à l'équilibre en raison de l'observation de la faible variation des teneurs en carbone par type de sol sur la période 1993 à 2015 (Allo et al., 2017), et de pratiques agricoles conservatrices vis-à-vis du carbone à La Réunion. Cependant, aucune mesure de stock n'a été réalisée dans le temps suivant un réel changement d'usage de la canne à sucre vers un autre usage agricole (diachronie).

Cependant, pour vérifier les calculs de variations de stock de COS entre la culture de la canne à sucre et les autres modes d'usages agricoles basés sur l'hypothèse de stabilité des teneurs en COS sous canne à sucre (cf. chapitre 4.1), les mesures des stocks de COS des campagnes de terrain en 2017 et 2018

(non analysées dans ce manuscrit de thèse) ont également été réalisées pour évaluer les différences de stocks de COS entre usages agricoles. L'objectif était de mesurer le stock de COS sous maraichage ou ananas à un stock de COS de référence sous culture de canne à sucre, ou de prairie dans les hauteurs de l'île, la canne à sucre n'étant cultivée qu'en dessous de 800 m d'altitude, à l'intérieur d'une unité pédoclimatique.

6.1.3.3 Un besoin de mesures isotopiques ^{13}C pour étudier la dynamique du COS

Bien que la canne à sucre soit considérée comme la référence pour le calcul des variations de stock de COS dans le cadre de l'approche en synchronie utilisée, ce choix basé sur une hypothèse de 'saturation' du stock de COS sous canne à sucre, nécessite d'être validé ou invalidé. Pour cela, a priori, une végétation naturelle telle que la forêt est généralement le témoin d'un stockage 'maximal' à l'équilibre faisant référence. De nouvelles mesures de stocks de COS sous forêt permettraient ainsi d'avoir une autre référence pour le calcul des variations de stocks de COS dues à des changements d'usages par rapport à une situation sous végétation naturelle. La comparaison des stocks de COS de ces deux usages (canne à sucre / forêt) semble donc nécessaire afin d'évaluer la fiabilité de la référence utilisée ici (canne à sucre). De plus, des analyses isotopiques de ^{13}C permettraient de connaitre l'origine du COS (plante à cycle photosynthétique C4/plante à cycle photosynthétique C3) afin d'appréhender la dynamique de remplacement du COS dans les sols agricoles réunionnais. Le ^{13}C est un isotope du carbone tel que le ^{12}C, avec une proportion moyenne faible (1,11 %). Cette proportion, légèrement variable, est mesurée par le $\delta^{13}C$ (déviation du rapport $^{13}C/^{12}C$ par rapport à un matériau servant de référence internationale). Sous végétation naturelle telle que la forêt (plantes à cycle C3 et $\delta^{13}C$ compris entre -22 et -33 ‰), la signature isotopique des MO du sol est très proche de celle de la végétation. Or, lorsque ces sols sont mis en culture, la signature isotopique de la MO du sol a deux origines : celle de la végétation naturelle et celle de la culture en place, qui dans le cas de La Réunion est la canne à sucre, plante à cycle C4 ($\delta^{13}C$ compris entre - 10 à -20 ‰). Les travaux de Basile-Doelsch et al. (2009) ont d'ailleurs montré l'intérêt de cette méthode à La Réunion entre deux parcelles voisines : un Ferralsol non cultivé (forêt secondaire avec verger de manguier) et un Ferralsol cultivé en canne à sucre depuis 186 ans. Dans les horizons de surface, pour la parcelle cultivée en canne à sucre depuis 186 ans, la MO est originaire de la canne, puis la MO est un mélange de MO issue de la végétation naturelle et de la canne à sucre pour les profondeurs intermédiaires. En dessous de 55 cm de profondeur, la MO semble issue de la végétation naturelle dans les deux parcelles. Ce type d'analyses, réalisées sur différents sites, pourrait ainsi nous aider à mieux connaitre la dynamique du COS suite aux différents changements d'usages ayant eu lieu à La Réunion.

6.1.4 Bilan GES suite à des scénarios de changements d'usages des terres agricoles

Les résultats présentés dans le chapitre 5 montrent que l'évaluation des variations de stocks de COS entre usages agricoles par unité pédoclimatique issue de la stratification du territoire a permis de définir des valeurs de stock de COS comme facteur d'émission Tier 2 dans le calculateur EX-ACT afin d'évaluer plus précisément les émissions de CO_2 du compartiment sol dans le cadre de scénarios de changements d'usage des terres agricoles. L'analyse des bilans GES des 4 scénarios de changement d'usage des terres agricoles considérés a effectivement montré le rôle important du compartiment sol dans les bilans GES à l'échelle territoriale. D'autre part, une comparaison des bilans GES suite à des changements d'usages des terres agricoles a été réalisée entre une approche spatiale (par unité pédoclimatique) et une approche générale simplificatrice (habituellement utilisé pour ce type de calculateur) où le territoire est considéré comme une seule et unique entité, définie par un seul type

de sol et de climat. Les résultats ont montré qu'une approche générale entraine une évaluation différente des variations de stocks de COS selon les changements d'usages, pouvant modifier l'ampleur et/ou le sens des émissions de GES, notamment pour le compartiment sol.

6.1.4.1 Un besoin de données spatialisées pour une approche territoriale du bilan de GES

Pour le secteur agricole, les inventaires des émissions de GES dues aux activités anthropiques étant le principal outil des politiques d'atténuation du changement climatique, il semble indispensable d'évaluer les émissions de GES par une approche spatiale, en particulier lorsque le territoire concerné est spatialement hétérogène d'un point de vue pédologique et climatique. La mise en place de systèmes MRV fiables nécessitent donc, a minima, des facteurs d'émissions Tier 2 adaptés au territoire étudié et à l'hétérogénéité spatiale des stocks de COS et de leurs déterminants. Or, si certaines données sont disponibles grâce à des travaux de recherches menées précédemment à La Réunion tels que les facteurs d'émissions liées au bétail, d'autres données restent difficiles à obtenir, notamment les données géolocalisées permettant de renseigner les informations requises par le calculateur et cela par unité pédoclimatique. Deux types de données sont difficiles à acquérir, soit ces données existent (tout du moins partiellement) mais n'étaient pas accessibles (ex : la géolocalisation des bâtiments d'élevage et les effectifs animaux associés), soit ces données n'existent pas, telles que la connaissance des pratiques agricoles (intrants) et leurs géolocalisations. Par conséquent, des données de différentes sources ont été utilisées conjointement pour obtenir les informations nécessaires au calculateur (cf. données supplémentaires « paramétrage EX-ACT » du chapitre 5).

6.1.4.2 Des scénarios très simples à faire évoluer

Le choix a été fait de définir uniquement 4 scénarios très simples de changements d'usages agricoles pour deux raisons principales : d'une part car l'objectif était d'illustrer le fonctionnement du calculateur par une analyse de sensibilité et d'autre part, car le résultat fourni par le calculateur EX-ACT ne permet que d'évaluer le type d'impact du scénario de changement d'usages agricoles analysé c'est-à-dire positif, neutre ou négatif. Cependant, les scénarios 'Mar' et 'Ana' restent relativement réalistes puisque si la culture de la canne à sucre est la culture majoritaire de l'île, sa diversification vers d'autres usages notamment maraichers et fruitiers est une réalité observée depuis plusieurs années. A l'inverse, les scénarios 'Gol' et 'Canne' ont été choisis pour une analyse de sensibilité puisqu'une transformation de l'ensemble des surfaces agricoles en canne à sucre est irréaliste dans un contexte insulaire où la recherche de l'autosuffisance, notamment sur le marché du frais pour les fruits et légumes, semble raisonnable et logique. Le scénario 'Gol' simulant la fermeture d'une des deux usines sucrières est, quant à lui, également assez irréaliste puisqu'il est probable que la fermeture d'une usine entrainerait la fermeture de la seconde. D'autre part, dans ce travail de thèse, les impacts indirects de certains scénarios de changements d'usages des terres agricoles n'ont pas été pris en compte, et pourraient impacter les bilans GES. Par exemple, l'augmentation ou la baisse de la disponibilité de la bagasse de la canne à sucre (co-produit) comme source d'énergie n'a pas été prise en compte dans les scénarios simulant une conversion de toutes les surfaces agricoles en canne à sucre ou simulant la fermeture de l'usine du Gol et la conversion de la moitié des surfaces en canne à sucre liées à cette usine sucrière.

6.1.4.3 Un besoin de nouvelles approches méthodologiques

Cependant, le calculateur EX-ACT reste un outil très simple et n'est pas conçu pour une description exhaustive du territoire (Colomb et al., 2012), il ne tient pas compte par exemple des émissions liées à l'alimentation animale importée, aux machines agricoles, aux émissions amonts des carburants, ni des émissions liées à l'apport d'azote dans les résidus de culture (Colomb et al., 2013a). Le développement de nouveaux calculateurs, voire l'adaptation d'un calculateur existant, pourrait être des pistes de recherche à envisager pour combiner une approche spatiale détaillée et une prise en compte la plus exhaustive possible des différents postes d'émissions de GES du territoire. D'autre part, l'utilisation de facteurs d'émissions (Tier 1 ou Tier 2) rend difficile l'évaluation de l'incertitude des résultats. Par conséquent, une approche méthodologique Tier 3 avec modélisation pourrait être l'étape suivante pour atteindre la fiabilité requise par les inventaires des émissions de GES dans le cadre d'une politique d'atténuation du changement climatique adaptée à chaque pays ou région du monde pour le secteur agricole.

6.2 L'initiative '4p1000' : quel potentiel de stockage de COS pour les sols agricoles de La Réunion ?

Selon l'initiative '4p1000', un taux de croissance annuel de 0,4% des stocks de carbone du sol, ou 4‰ par an, dans les premiers 30 à 40 cm de sol, réduirait de manière significative la concentration de CO_2 dans l'atmosphère liée aux activités humaines. Or, pour atteindre un tel objectif, le potentiel de stockage de COS du sol doit être estimé, c'est d'ailleurs le premier pilier de recherche proposé par le comité scientifique et technique de l'initiative.

6.2.1 Le potentiel de stockage de COS des sols agricoles de La Réunion

A La Réunion, les travaux présentés dans ce travail de thèse indiquent que **le potentiel de stockage est limité**. Les stocks sous canne à sucre, supposés à l'équilibre, sont élevés, le stock de COS moyen sous canne à sucre étant estimé à 131 MgC ha^{-1}. Dans les Hauts de l'île, où les températures sont plus faibles et les précipitations plus importantes, les stocks de COS sous prairie sont très élevés, avec en moyenne un stock de COS de 196 MgC ha^{-1}. Or, les surfaces en canne à sucre et en prairie représentent près des trois des surfaces agricoles de La Réunion, ce qui limitent fortement le potentiel de stockage de carbone dans les sols agricoles réunionnais. A l'inverse, si les stocks de COS sont élevés, les variations de stocks de COS estimées dans cette étude ont montré un **risque de déstockage important**, de l'ordre de 20 MgC ha^{-1} lorsque les changements d'usages concernent la conversion de surfaces de canne à sucre en maraichage ou en ananas. La durée sur laquelle de telles variations de stocks de COS ont eu lieu n'est pas connue puisque cette étude a été réalisée par une approche en synchronie. Mais ces changements de stocks de COS se sont probablement déroulés sur une période maximale estimée entre 20 et 30 ans, la diversification de la monoculture de la canne à sucre étant assez récente. Or, sur une période de 20 ans, ces changements d'usages représentent des taux de déstockage du carbone de l'ordre de 1 tC ha^{-1} an^{-1} pour l'horizon 0-30 cm. A l'échelle de La Réunion, le risque de déstockage du COS est donc une problématique importante à prendre en compte.

Au vu des résultats obtenus dans cette étude, deux solutions semblent à envisager et à encourager pour d'assurer la pérennité des stocks de COS élevés des sols agricoles de La Réunion : d'une part, et *a minima*, **préserver les stocks de COS** existants par le maintien des pratiques conservatrices vis-à-vis du carbone telles que le sont par exemple les pratiques de non brulis, de résidus de cultures laissés au

sol et un travail du sol uniquement à la replantation en moyenne tous les 7 ans pour la canne à sucre ; et d'autre part, **augmenter les stocks de COS** pour atteindre un nouvel état d'équilibre. Dans le contexte réunionnais, si l'on se base sur l'hypothèse de saturation en COS des sols sous canne à sucre (stabilité des teneurs en COS observées sur 20 ans couplée à des pratiques favorisant des apports annuels de carbone au sol très élevés), **la canne à sucre apparait comme un possible levier de reconstitution du stock de COS**. En effet, en raison des apports élevés de carbone au sol, la canne à sucre intégrée comme une rotation, à la fois dans le temps et dans l'espace, avec du maraichage (parcelles très spécialisées à La Réunion) ou une culture d'ananas pourrait éventuellement permettre de reconstituer un stock de COS avant de repasser à des cultures maraichères et fruitières nécessaires à l'autosuffisance alimentaire de l'île. Intégrer la prairie dans des rotations dans le temps et dans l'espace pourrait également être un levier pour reconstituer le stock de COS.

Cependant, avec des pratiques de gestion appropriées, les sols agricoles peuvent stocker plus de carbone, et une partie de ce stockage peut durer des décennies ou des siècles. L'initiative 4p1000 vise d'ailleurs à augmenter les stocks de COS des sols agricoles en utilisant des pratiques agroécologiques. Cinq pratiques sont mises en exergue : (1) éviter de laisser le sol à nu pour limiter les pertes de carbone ; (2) restaurer les cultures, les pâturages et les forêts dégradées ; (3) planter arbres et légumineuses qui fixent l'azote atmosphérique dans le sol ; (4) nourrir le sol de fumiers et de composts et (5) conserver et collecter l'eau au pied des plantes pour favoriser la croissance végétale.

6.2.2 Quels leviers pour stocker plus de carbone organique dans les sols agricoles de La Réunion ?

De manière générale, deux solutions sont possibles pour augmenter les stocks de COS : augmenter les entrées de carbone et/ou diminuer les pertes de carbone à taux constant d'apports organiques. Mais quelles pratiques peuvent être envisagées dans le contexte réunionnais ?

6.2.2.1 Leviers d'augmentation du stock de COS et limites biophysiques du stockage (biomasses, nutriments)

6.2.2.1.1 Augmenter les apports endogènes de carbone organique

L'une des pratiques visant à augmenter les apports endogènes est de ne pas exporter les MO hors des parcelles cultivées, pour limiter les pertes de carbone des sols. C'est le cas à La Réunion pour la canne à sucre où les résidus de cultures sont laissés au champ et ne sont pas brûlés. Toutefois, la paille de canne est parfois exportée vers des élevages bovins. Mais hormis la production de biomasse aérienne, qu'elle soit récoltée (tige usinable, éventuellement paille) ou laissée au champ (paille), la canne à sucre peut-elle apporter du carbone organique au sol par sa biomasse racinaire ? Des travaux récents montrent que les apports racinaires (rhizodéposition, exsudats et autres composés), souvent sous-estimés par ailleurs, constitueraient une grande part des apports de MO susceptibles d'être stabilisé dans les sols, notamment en profondeur tandis que les apports de litière aérienne seraient rapidement minéralisés (Derrien et al., 2016). D'après Rasse et al. (2005), le temps de résidence moyen du carbone issu de la biomasse racinaire est 2.4 plus élevé que celui du carbone issu de la biomasse aérienne. L'architecture et le profil d'enracinement détermine la quantité et la localisation des apports de MO dans le sol et la distribution verticale du COS pour certaines espèces (Jobbágy and Jackson, 2000). Des apports racinaires semblent donc intéressants pour augmenter le stock du COS. Or, la canne à sucre est une plante à fort enracinement. A La Réunion, l'enracinement, en termes de densité de longueur racinaire par unité de volume de sol (LVR), est estimé à 80% dans les 60 premiers cm du sol. Cependant, l'enracinement est plus profond avec des profondeurs racinaires maximales allant jusqu'à 4 m

(Chopart et al., 2008). D'autre part, d'après le modèle 'CompoBioCas' d'estimation de la biomasse de la canne à sucre de La Réunion, la biomasse totale de la canne à sucre a été estimée à 21tC ha^{-1} en moyenne dont environ 2.5 tC ha^{-1} correspondent à de la biomasse racinaire. La canne à sucre, par apport endogène de sa biomasse racinaire, semble donc pouvoir apporter du carbone organique au sol.

6.2.2.1.2 Augmenter les apports exogènes de carbone organique

Augmenter les apports exogènes que sont les amendements organiques tels que les effluents d'élevage (fumier et composts) est un levier indispensable pour augmenter le stock de carbone organique du sol. A La Réunion, les élevages bovins, ovins, caprins, porcins et avicoles produisent différents types d'effluents. Sur les prairies associées aux élevages, notamment dans les Haut de l'île, les amendements organiques sont importants (parfois excédentaires aux besoins) soit directement par les déjections des animaux soit par épandage des effluents. A l'inverse, les prairies des Bas destinées à la production fourragère uniquement sont fertilisées majoritairement par des engrais minéraux. Mis à part le cas particulier des prairies des Hauts, l'augmentation des apports d'effluents d'élevage sur les cultures soulève la problématique de la disponibilité de ces matières dans ce contexte insulaire, la question est effectivement de savoir si les nouveaux besoins en effluents pour augmenter les stocks de COS correspondent ou non aux quantités disponibles dans les élevages. D'autre part, en plus de l'adéquation théorique entre la demande et l'offre en effluents, se pose la question de la possibilité d'amener ces effluents sur les cultures dans des contextes où les élevages producteurs d'effluents et les cultures en demande d'effluents sont spatialement éloignés. C'est le cas à La Réunion où la canne à sucre se situe dans les Bas de l'île en dessous de 800 m d'altitude tandis que les zones d'élevage se situent majoritairement dans les Hauts de l'île. Mais les inégalités entre offre et demande d'effluents concernent également le maraichage : la proximité des zones maraichères et des zones d'élevage dans les Hauts de l'île tend à favoriser les échanges tandis que l'éloignement de certaines autres zones maraichères limitent parfois ces échanges. Toutefois, dans la pratique, les apports exogènes de MO sur canne à sucre (notamment lisier de porcs) ou sur maraichage (fumiers, fientes, composts, …) sont réels. La quasi-totalité des exploitations maraichères apportent de la MO (93 % des exploitations ont apporté au moins une fois de la matière organique en 5 ans) issues à 86 % de l'extérieur de l'exploitation maraichère et 4 fois plus souvent qu'en métropole (DAAF La Réunion, 2016).

Cependant, d'autres matières organiques exogènes issues d'activités urbaines ou industrielles ou des produits issus de leur traitement (boues de STEP, composts de boues de STEP ou de déchets verts) peuvent éventuellement être utilisées bien que l'aspect de sécurité sanitaire (contaminants organiques, métalliques ou agents pathogènes) soit une limite pour leur utilisation en agriculture. Dans le cadre du projet SOERE-PRO (Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement – Produits Résiduaires Organiques) de La Réunion, débuté en 2013, les résultats montrent que les fertilisants organiques testés (boue chaulée et séchée issue de la station d'épuration du Grand Prado, lisier de porcs et fumier avicole) seraient adaptés aux sols et aux besoins de la canne à sucre à la Réunion. Il serait ainsi possible de substituer, en grande partie, des engrais organiques aux engrais minéraux sur les sols réunionnais, sans que la richesse en sucre ne soit altérée dans le cas de la culture de la canne et sans perte de rendement. De plus, les boues de la station d'épuration du Grand Prado ont reçu en début d'année 2019 une homologation par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation et de l'environnement (Anses) comme produit fertilisant nommé « FertilPéi » et constituerait un substitut partiel aux engrais chimiques pour la canne à sucre.

D'autre part, à La Réunion, la problématique de l'adéquation entre les besoins et les disponibilités des biomasses dans un contexte d'économie circulaire fait actuellement l'objet d'un projet de recherche. Débuté en 2016, le projet GABIR « Gestion Agricole des Biomasses à l'échelle de La Réunion : vers des outils de mobilisation collective et de prospective pour une agriculture circulaire » a pour objectif d'améliorer l'autonomie des exploitations et plus globalement du secteur agricole face aux ressources importées sous forme de fertilisants minéraux, de tourbes horticoles et d'aliments pour les animaux. Il s'agit effectivement de faire l'inventaire des biomasses valorisées ou valorisables dans le secteur agricole local et d'analyser les flux afin de développer des outils de mobilisation collective et de prospective via la co-construction de modèle(s) de simulation des échanges de biomasses entre les différents acteurs du territoire (consommateurs, producteurs et transformateurs) et de leurs impacts économiques et environnementaux à l'échelle de l'île. Une meilleure connaissance de la disponibilité des différentes biomasses et le développement des circuits pour mettre en relation l'offre et la demande devrait permettre, à terme, de faire évoluer positivement les échanges de biomasses, notamment de matières organiques depuis les zones de production d'effluents vers les cultures (canne à sucre, maraichage, prairie).

6.2.2.1.3 Stocker du COS en profondeur ?

L'initiative 4p1000 concerne les horizons de surfaces (0-30 ou 0-40 cm de profondeur), or l'une des critiques faites à cette initiative est celle de la non prise en compte des horizons profonds (30-100 cm). Ces horizons sont-ils de bons candidats pour augmenter les stocks de COS ?

Les travaux sur le carbone des sols volcaniques hawaïens réalisés par Torn et al., 1997 montraient, par méthode isotopique (ratio $^{14}C/^{12}C$), que les horizons de surface étaient dominés par du COS ayant un renouvellement rapide pour tandis que les horizons profonds étaient dominés par du COS avec un temps de résidence long (fraction stable). D'autre part, une fraction significative du COS, de 33% (pour des sols dont la roche mère est datée entre 300 et 2 100 ans) à 70 % (pour des sols dont la roche mère est datée entre 20 000 et 150 000 ans) se trouvait en dessous des 20 premiers cm de sol. Plus récemment, l'étude de Balesdent et al. (2018) a montré, par une meta-analyse sur 55 profils de sol sous prairie et forêts en zone tropicale, que le carbone âgé de moins de 50 ans représentait 45 % du carbone dans les horizons de surface (0-30 cm) contre 13 % dans les horizons profonds. En termes de dynamique, l'étude de Balesdent et al. (2017) a montré que le renouvellement du carbone était 4 fois plus lent en profondeur (30-100 cm) qu'en surface (0-30 cm) avec un flux annuel d'apport de carbone de 81 % dans l'horizon 0-30cm contre 19 % dans l'horizon 30-100 cm, et une erreur standard de ± 4 %. Or sur 20 ans, le stock de COS de l'horizon 30-100 cm est constitué de 23 % de carbone récent apporté au sol. Ces travaux confirme donc qu'il est possible de stocker du carbone en profondeur et cela, à des échelles de quelques décennies. Dans les horizons profonds, l'âge et la nature du carbone sont dépendant du type de sol (Mathieu et al., 2015) et le carbone est majoritairement du matériel microbien stabilisé par interaction avec les minéraux, et stabilisé par la limitation énergétique subie par la biomasse microbienne en absence d'apport (Fontaine et al., 2007). Or, Fontaine et al. (2007) ont également montré que l'apport de carbone issu de biomasse végétale fraiche dans des horizons profonds (60-80 cm de profondeur) en laboratoire avait stimulé la minéralisation de carbone âgé, supposé stable (« priming effect »). Des processus de stabilisation et de minéralisation sont donc en jeu, simultanément, dans les horizons profonds, comme dans les horizons de surface, et là encore, la balance stockage et déstockage de C due aux organismes du sol est incertaine. Cependant, l'étude de Zieger et al. (2018) a montré qu'un apport massif de carbone sur 20 ans (1800 MgC ha^{-1} an^{-1}) dans un Andosol riche en carbone (stock de COS de 301 MgC ha^{-1} pour l'horizon 0-100 cm) avait entrainé une augmentation significative du stock de COS uniquement dans les horizons profonds (25-50 cm de

profondeur) où le carbone était stabilisé dans les complexes organo-minéraux (Al-MO et imogolite-MO). Ces résultats restent à relativiser en raison des apports extrêmement importants sur une longue période de temps et sur des Andosols déjà riches en COS ayant aboutis à une augmentation du stock de COS par migration des apports de carbone dans les horizons profonds mais aucune augmentation significative du stock de COS sur l'ensemble du premier mètre de sol.

6.2.2.2 Risques de pertes de COS et d'émissions concomitantes de GES

6.2.2.2.1 Des risques liés aux apports de COS et d'intrants

Sachant que l'essentiel des stocks d'azote dans les sols est sous forme organique, la teneur en MO est liée au potentiel de fourniture d'azote par la minéralisation. Selon Pellerin et al. (2019), l'augmentation de la teneur en MO du sol, en accroissant et le flux d'azote minéralisé et nitrifié dans le sol, devrait donc se traduire par des pertes plus importantes de N_2O et c'est ce que les modélisations : l'augmentation de la teneur en C des sols a un effet significatif sur la production de N_2O. Des résultats de recherche issus du projet SOERE-PRO sur le site de Qualiagro (Feucherolles, Yvelines) confirment également que si l'apport de PRO (produits résiduaires organiques) permet d'augmenter de manière significative le stock de COS et d'apporter des co-bénéfices tels que l'amélioration de la fertilité et de la structure du sol), il présente des risques d'émissions de N_2O et de volatilisation de NH_3 (Peltre et al., 2012). A l'inverse, et peut-être en raison des moyennes réalisées, deux meta-analyses (Han et al., 2016; Yue et al., 2016) montrent que l'apport d'azote (par fertilisation minérale ou organique) entraine une augmentation des entrées de carbone au sol (mais une augmentation du stock de COS uniquement dans les horizons organiques) et une absence de changements des flux de sorties.

De manière générale, il est donc recommandé, pour augmenter le stock de COS, de réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse (pour augmenter les rendements et les apports endogènes) qui génèrent des émissions de CO_2 dès leur fabrication, en les utilisant mieux et de valoriser plus les ressources organiques qui couplent un effet fertilisant et amendant. A titre d'exemple, pour le maraichage où sont utilisées les apports de MO exogènes, la DAAF de La Réunion (2016) indique des écarts variables et parfois importants entre la dose minérale apportée et les besoins des cultures, et préconise une meilleure prise en compte de la fumure organique apportée dans le raisonnement des apports complémentaires d'engrais minéraux. Dans les simulations de changements d'usages agricoles de cette étude, une augmentation des apports en urée (correspondant à près de la majorité des apports azotés sous canne à sucre à La Réunion) liée à l'augmentation de surfaces en canne à sucre a effectivement entrainé à la fois une augmentation des émissions de N_2O mais aussi de CO_2 du sol. Dans ce contexte, un changement de pratiques vers une fertilisation organique pourrait donc diminuer les émissions de CO_2, d'autant plus qu'une fertilisation organique issue des élevages locaux exclut les émissions de GES dues aux transports maritimes nécessaires à l'acheminement de la quasi-totalité des intrants (engrais, aliments, …) pour le secteur agricole à La Réunion.

6.2.2.2.2 Des risques de sur-minéralisation liés au « priming effect »

L'apport de MO fraîche peut induire une sur-minéralisation des MO du sol, c'est le « priming effect » qui correspond à « la stimulation de la minéralisation des MOS consécutive à un ajout de carbone, conduisant à un flux de minéralisation supérieur à la somme de la minéralisation du sol sans ajout et de la minéralisation du carbone provenant de l'ajout » (Pellerin et al., 2019). Il s'explique par trois mécanismes que sont la stimulation de l'activité (1) des communautés microbiennes adaptées à la dégradation des ressources labiles, et (2) des communautés microbiennes adaptées à la dégradation de substrats moins biodégradables mais également de (3) l'action d'exsudats racinaires qui

désorganisent les associations organo-minérales du sol favorisant ainsi l'accès au composés organiques par les micro-organismes (Derrien et al., 2016). Par conséquent, le « priming effect » présente, en plus d'un stockage de C non proportionnel aux apports, un risque de déstabilisation de MO préexistantes par apport de carbone, notamment en profondeur (Fontaine et al., 2007).

6.2.2.2.3 Des risques de pertes par minéralisation due au travail du sol

Le travail du sol, en modifiant les propriétés du sol, physique (structure, densité) ou biologique (activité des décomposeurs), peut être à l'origine de taux de minéralisation plus intenses par mélange des horizons et destruction des agrégats (Wei et al., 2015). Cependant, les effets du travail du sol sur le stockage du COS sont ré-évalués : (1) aucun effet significatif du travail du sol n'a été observé sur les stocks de Cos sur 41 ans sur un site expérimental de grandes cultures du Bassin Parisien (Dimassi et al., 2013), (2) peu d'effet du non-labour a été observé sur le stock de COS d'après la meta-analyse de Virto et al. (2012) bien que les pratiques secondaires liées au non-labour (choix des espèces cultivées, nombre de rotations) aient un effet positif sur le stock de COS (Virto et al., 2012) (Derrien et al., 2016). A La Réunion, modifier les pratiques concernant le travail du sol semble, a priori, être un levier d'action peu intéressant pour la canne à sucre où le travail du sol est aujourd'hui réduit à un seul passage lors de la replantation (moyenne tous les 7 ou 10 ans). A l'inverse, pour le maraichage, le développement de pratiques agroécologiques avec une diminution du travail du sol serait un levier intéressant pour lutter contre le déstockage de COS.

6.2.3 Stocker du COS mais pour combien de temps ?

Augmenter le stock de COS suite à un changement de gestion, soit par changement de mode d'usage ou de pratiques agricoles, est possible mais lent. Il est généralement considéré que plusieurs décennies (20 ans selon les lignes directrices de l'IPCC) sont nécessaires pour atteindre un nouvel état d'équilibre. De plus, plusieurs critiques ont été faites à l'initiative 4p1000 car le stockage de COS est transitoire, il est à la fois limité et réversible (Figure 6.3).

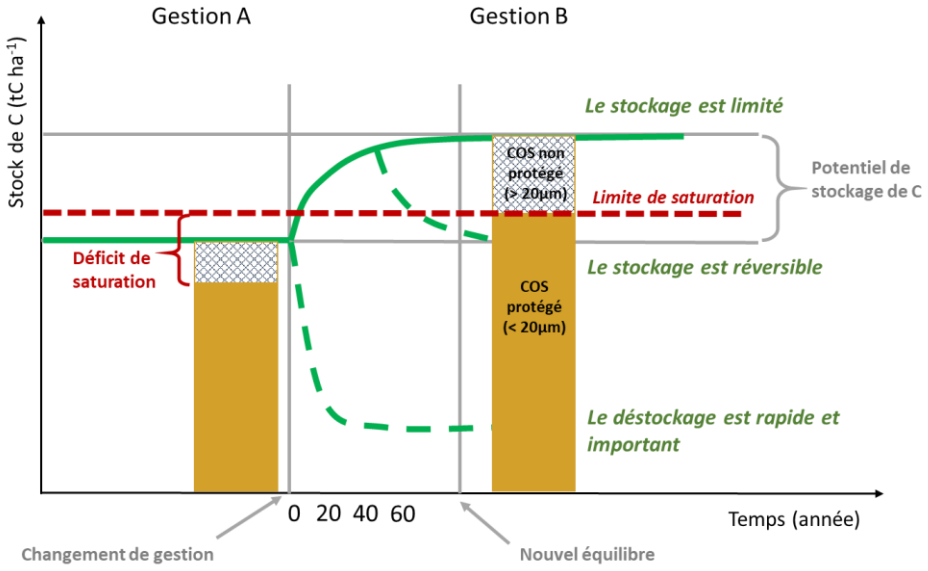


FIGURE 6.3 : SCHEMA D'EVOLUTION DU STOCK DE COS SUITE A UN CHANGEMENT DE GESTION, D'APRES CHENU (2016) ET BARRÉ ET AL. (2017)

6.2.3.1 Un stockage limité…

Le potentiel de stockage (Figure 6.3) est le stockage additionnel lié à l'adoption d'une nouvelle gestion par rapport au stockage (ou déstockage) qui aurait été observé avec la gestion actuelle. Mais le stockage de COS reste limité lorsque le stock de COS atteint un nouvel état d'équilibre. Deux concepts sont débattus : le premier concept considère une relation linéaire entre les entrées de carbone et le stock de COS à l'état d'équilibre tandis que le second considère que le stock de COS a une limite maximale (appelée « saturation ») ne pouvant pas être dépassée malgré l'apport supplémentaire de carbone (Stewart et al., 2007). Cependant, le concept de saturation est basé au départ sur l'hypothèse, développée par Hassink (1997), que les sols ont une capacité finie à protéger le COS de la minéralisation c'est-à-dire une capacité finie à stocker du carbone pour des décennies ou plus. Il définit ainsi la capacité de saturation en carbone du sol. Or, dans ce concept, la saturation ne concerne pas le stock total de COS mais uniquement le stock de COS de la fraction fine du sol (< 20 µm). Dans ce cadre, connaitre le stock de COS à la limite imposée par la saturation permettrait d'estimer le déficit de saturation correspondant à la différence entre le stock de COS actuel (dans le cas d'un sol non saturé en COS) et le stock de COS à saturation pour la fraction fine (Figure 6.3).

6.2.3.2 … jusqu'à saturation ?

Connaitre la limite de saturation et le déficit de saturation est une question de recherche importante car elle a pour objectif de savoir où il serait pertinent de stocker plus de COS dans le compartiment stable, et donc potentiellement pour plusieurs décennies. Pour Hassink (1997), la teneur en COS de la fraction fine (ff) du sol (< 20µm) est directement liée à la masse de la ff (%), il propose ainsi l'équation suivante pour évaluer la limite de saturation du carbone: Csat = 4.09 (± 1.59) + 0.37 (± 0.04) x ff. Depuis 1997, plusieurs travaux ont été réalisés pour tenter d'évaluer cette limite de saturation. En 2002, (J. Six et al., 2002) proposaient d'utiliser la proportion (%) d'argiles et de limons pour estimer la limite de saturation des teneurs en COS pour différents modes d'usages et types de sol (argiles 1 :1 ; argile 2 :1). Cependant, en 2013, l'utilisation de méthode de régression linéaire des moindres carrés a été critiqué par (Feng et al., 2013) qui stipulaient qu'elle sous-estimait la capacité maximale de stabilisation du COS par la fraction fine du sol (la droite de régression passant par les valeurs moyennes). Ils proposèrent ainsi deux méthodes alternatives : une méthode statistique « boundary line analysis » où seules les teneurs en COS (le dixième percentile le plus haut des teneurs en COS du jeu de données) des sols ayant supposément atteint la limite maximale de stabilisation du COS sont utilisées pour établir une relation entre la teneur en COS de la ff et la masse de la ff ; et une méthode mécanistique basée sur le « organic C loading » c'est-à-dire à la capacité des surfaces minérales (« Specific Surface Area » (SSA)) à absorber du COS (« monolayer equivalent C loading » = 1 mgC m^{-2} selon Mayer (1994)) bien que les indicateurs utilisés soient reconnus comme très limités et non validés. En Nouvelle-Zélande, les travaux de (Beare et al., 2014) ont également développé de nouvelles méthodes statistiques (« quantile regression ») où le 90ème quantile du jeu de données permet d'estimer la limite de saturation. Mais ils ont également repris la méthode mécanistique du « OC loading » (en utilisant le logarithme de la teneur en COS et de la SSA) et se sont basés sur l'estimation indirecte de la SSA à partir de la teneur en eau des échantillons de sol séchés à l'air, méthode développée par Parfitt et al. (2001). Toutefois, leurs travaux vont plus loin encore et propose d'utiliser plusieurs autres facteurs pour expliquer la saturation du COS, le modèle utilisant une méthode de régression quantile multivariée (« multivariate quantile regression » avec pour facteurs Alp et pH en plus de la SSA) semble fournir les meilleurs résultats. Les travaux de McNally et al. (2017) ont ensuite poursuivi ces travaux en approfondissant les différences entre les sols allophaniques et non allophaniques, et ont calculés des déficits de saturation pour les sols cultivés et les prairies permanentes pour l'horizon 0-15 cm. Les résultats montrent de nettes différences de déficit de saturation entre les différents types de sol.

L'ensemble de ces travaux fournit ainsi des perspectives de recherche intéressantes pour évaluer le déficit de saturation des sols agricoles réunionnais, avec notamment la spectroscopie infrarouge comme outil d'estimation indirecte des facteurs (Alp, Alo, …) pouvant expliquer la quantité maximale de COS stabilisé.

6.2.3.3 Un stockage réversible ?

Bien que le concept de saturation reste débattu, l'une des questions qui en résulte est la suivante : peut-on estimer le potentiel de stockage en estimant le déficit de saturation ? Selon Barré et al. (2017), la réponse est non puisqu'une part significative du COS peut être contenu dans la fraction du sol supérieure à 20 µm bien que le COS associé à cette fraction ait des temps de résidence dans le sol plus faibles que le COS associé à la fraction fine (< 20 µm) du sol (complexes organo-minéraux).

L'évolution du stock de COS pose ainsi question si les pratiques ayant permis de l'augmenter ne sont pas maintenues, notamment celui correspondant au COS non protégés à long terme (fraction > 20 µm) qui peut représenter plus de 20 % du stock total dans les sols cultivés en milieu tropical (Barthès et al., 2008; Gelaw et al., 2015). Le COS non protégé au sein de la fraction minérale du sol, s'il n'est pas renouvelé par de nouveaux apports de C, risque ainsi d'être minéralisé, et un déstockage serait alors observé. Le stockage, en plus d'être limité, est donc également réversible. D'autre part, les minéraux mal-cristallisés ont des cinétiques d'altération pouvant être de quelques années dans les sols (Derrien et al., 2016) ce qui signifie que la minéralisation des MO, suite à la déstabilisation des parties minérales des complexes organo-minéraux (Keiluweit et al., 2015; Wen et al., 2014) pourrait se faire à l'échelle de quelques années. Par conséquent, les phases minérales ne seraient pas des surfaces stables à l'échelle de la pédogenèse et le risque de minéralisation concernerait donc le COS considéré, jusqu'à présent, stable à long terme.

La non permanence du stockage de carbone organique dans les sols est vue comme une limitation dans le rôle des sols pour lutter contre le changement climatique (Smith, 2012). Cependant, l'objectif est bien d'augmenter le stock de COS par rapport à une situation de référence et non dans l'absolu car l'important est de limiter au maximum le déstockage de COS qui peut être rapide et important, notamment pour des situations où les stocks de COS sont très élevés.

6.2.3.4 Quel est le temps de résidence du COS qui constitue le stock de COS des sols agricoles de La Réunion ?

Si un certain nombre de mesures de stocks de COS ont été réalisées de 2015 à 2019, de nouvelles analyses pourraient être envisagées, notamment pour étudier le temps de résidence du COS et la part des différents compartiments dans les stocks de COS des sols agricoles de La Réunion. D'une part, pour évaluer le stock de COS 'protégé' (Figure 6.3) et étudier le concept de saturation, des analyses par fractionnement granulométrique (norme NF X31-516 septembre 2007) permettant de séparer les différentes fractions du sol correspondant à différents compartiments, notamment la fraction fine (< 20 ou < 50 µm) pour le compartiment stable et la fraction 50-200 µm pour le compartiment labile, seraient nécessaires. D'autre part, des analyses par pyrolyse Rock-Eval pourraient être intéressantes pour étudier les différentes formes de MO du sol (matières organiques biogènes thermiquement labiles, ou matières organiques associés à la phase minérale thermiquement stables) (Sebag et al., 2016).

6.2.3.5 Remonter le temps en manipulant les associations organo-minérales pour stocker plus de COS ?

Une pratique, très ancienne à l'île Maurice (H.M.-L., 1948) consiste à broyer des roches basaltiques afin de « rajeunir » les sols. Le principe consiste à recréer un apport artificiel de 'cendres' volcaniques riches en verre dont l'altération est assez rapide afin de créer de nouvelles surfaces capables de complexer la matière organique. En effet, d'après le modèle conceptuel de Basile-Doelsch et al. (2015), il y aurait une synergie entre altération continue des minéraux et dynamique de formation des nano complexes organo-minéraux c'est-à-dire que l'altération des minéraux génère des minéraux amorphes nanométriques dont la réactivité et la surface spécifique élevées favorisent les interactions avec les composés organiques. Une étude de Ramos et al. (2017) réalisée au Brésil montre également l'intérêt de ces roches comme fertilisants naturels. D'autre part, Minasny et al. (2017) souligne l'intérêt de cette pratique en Australie à la fois pour stocker plus de COS et augmenter la productivité (McBratney et al., 2016) dans le cadre des objectifs de l'Initiative '4p1000'. Beerling et al. (2018) estime que l'ajout de roches basaltiques broyées sur des sols cultivés est une stratégie de séquestration du CO_2 intéressante qui aurait la capacité d'améliorer les rendements, la protection contre les ravageurs et maladies ainsi que de restaurer la fertilité et la structure du sol. Dans le cadre de l'initiative 4p1000 à La Réunion, ce type de technique pourrait être un moyen intéressant pour améliorer le potentiel de stockage de COS, notamment dans des zones agricoles très caillouteuses.

6.2.3.6 Quel potentiel de stockage de COS avec le changement climatique ?

Une autre critique faite à l'initiative 4p1000 est la non prise en compte du changement climatique (CC) qui pourrait modifier le bénéfice attendu du stockage additionnel de carbone dans les sols. En effet, quelle balance entre l'accélération de la minéralisation par l'activité microbienne sous l'effet de l'augmentation de la température (entrainant une accélération du CC) et l'augmentation des rendements et des apports de carbone organique au sol par l'augmentation en CO_2 dans l'atmosphère ? De plus, l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes pourraient exacerber des mécanismes tels que l'érosion et ainsi entrainait de nouvelles pertes de COS. Peñuelas et al. (2017) émettent l'hypothèse d'un changement d'une période basée sur les effets positifs de la fertilisation et du CO_2 sur la végétation à une période caractérisée par des contraintes (limites de la disponibilité des nutriments, des ressources en eau, …) sur la croissance des plantes couplées à d'autres effets négatifs du CC. Toutefois, les impacts (ampleur et sens) du changement climatique sur les stocks de COS font débat (Bradford et al., 2016). A titre d'exemple, l'étude de Crowther et al. (2016) montrait (à partir de données des États-Unis, d'Europe et d'Asie) qu'une perte de 30 ± 30 GtC à 203 ± 161 GtC des stocks de COS totaux des horizons de surfaces pourrait avoir lieu sous 1°C de réchauffement alors que d'autres auteurs ont montré un impact des pratiques supérieur à celui de l'augmentation des températures sur les variations de stock de COS en Indonésie et en Corée (Minasny et al., 2012). A La Réunion, les modèles globaux climatiques prévoient une hausse des températures pour la fin du siècle dans une fourchette comprise entre 1,7 et 2,6°C selon les 2 scénarios (RCP6.0 et RCP8.5*) et une baisse des précipitations pendant l'hiver (MétéoFrance, 2015). Or, augmenter les entrées de carbone en augmentant la quantité de biomasse (aérienne et racinaire) restituée au sol nécessite des rendements plus élevés. Augmenter les rendements dans un contexte de changement climatique pourrait être un objectif difficile à atteindre. Toutefois, dans le cadre de l'initiative 4p1000, et face au risque de déstockage du COS sous l'action du changement climatique, l'adoption d'une gestion qui pourrait permettre un stockage additionnel semble donc d'autant plus utile car l'objectif principal n'est pas une augmentation absolue du stock de COS mais une augmentation relative du stock de COS par rapport au stockage qui aurait été observé avec la gestion actuelle.

6.2.3.7 Quel stockage de COS face à une urbanisation croissante ?

L'étude des stocks de COS en milieu urbain fait actuellement l'objet de nombreuses recherches. Bien que les sols urbains ouverts représentent probablement d'importants réservoirs de COS, le stock de carbone et le potentiel de stockage en milieu urbain sont encore insuffisamment documentés notamment pour les sols scellés (Cambou et al., 2018). D'autre part, l'artificialisation des sols dont l'urbanisation est le principal moteur est une problématique importante vis-à-vis de la gestion de l'usage des terres puisque l'urbanisation consomme des sols souvent à fort potentiel agricole et leur imperméabilisation empêche le sol d'assurer toutes ses fonctions.

Or, l'artificialisation des sols à La Réunion est de 11.5 % (contre 9.3% en métropole en 2015) ce qui en fait le 3ème DOM le plus artificialisé (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, 2016). La Réunion est un territoire aux ressources foncières restreintes étant donné que 42% du territoire est occupé par le Parc National de La Réunion, mais où la densité de population est tout de même de 333 habitants/km^2 (contre 23 habitants/km^2 en moyenne dans les DOM) (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, 2016). L'urbanisation est un véritable enjeu et menace le foncier agricole d'émiettement et de réduction de ses surfaces. En 20 ans, de 1992 à 2012, la surface agricole a diminué de 5000 ha bien que les surfaces appartenant à des non-agriculteurs (jardins, vergers, …) aient augmenté d'autant, expliquant la quasi-stagnation des surfaces de sols cultivés et le morcellement des parcelles agricoles. De 2006 à 2012, l'artificialisation des sols a progressé de 310 ha an^{-1}. Les tâches urbaines, déjà étalées, continuent de se densifier, et grignotent l'espace agricole et les zones de friches (Figure 6.4). De plus, cette artificialisation a entrainé une forte concurrence pour le foncier agricole qui se raréfie et dont les prix s'envolent (DAAF La Réunion, 2015).

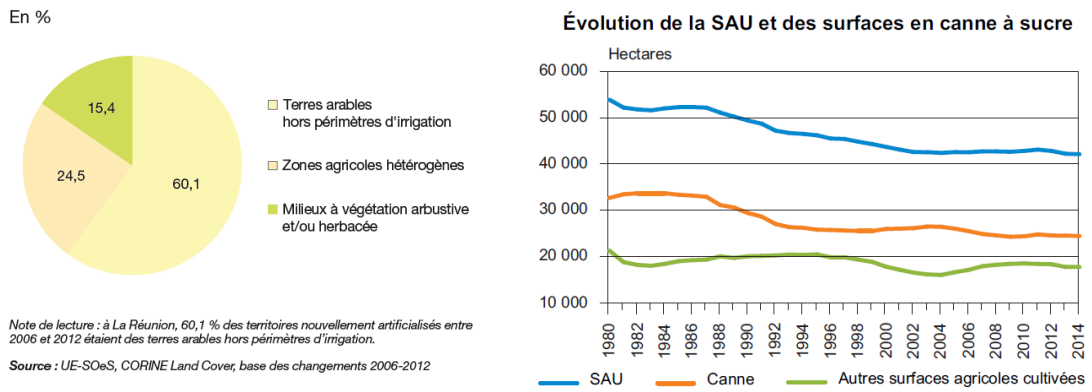


FIGURE 6.4 : (A) REPARTITION DE L'ORIGINE DES SURFACES NOUVELLEMENT ARTIFICIALISEES ENTRE 2006 ET 2012, EXTRAIT DE MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ENERGIE ET DE LA MER (2016) ET EVOLUTION DE LA SAU DE 1980 A 2014 (B) , EXTRAIT DE DAAF LA REUNION (2015)

Toutefois, malgré l'artificialisation, la SAU est stabilisée aux alentours de 42 500 ha correspondant à la stabilisation des surfaces en canne à sucre autour de 24 500 ha depuis les années 2000. Les autres surfaces agricoles (18 000 ha) s'équilibrent autour des fruits et légumes et de l'élevage. Cependant, derrière cette apparente stabilité des surfaces, il y a eu des changements qualitatifs opérés depuis les années 80 avec des reconquêtes de terres agricoles sur les friches et sur les pentes, que ce soit sur le littoral avec le projet ILO (Irrigation du Littoral Ouest) qui a permis de gagner 7 000 ha de terres cultivables, ou bien dans les Hauts avec la création de prairies. Depuis les années 2000, une augmentation des surfaces consacrées aux cultures maraîchères a également été observée, correspondant, en partie, à une diversification de la canne à sucre (DAAF La Réunion, 2015). Selon la

DAAF de La Réunion (2015), le maintien de la SAU s'explique par le SAR (Schéma d'aménagement Régional) de La Réunion, principal outil de planification de l'aménagement du territoire, qui fixe comme priorité la réduction du rythme de consommation des espaces agricoles ainsi que la poursuite de l'augmentation de surfaces agricoles par la mise en culture des espaces de reconquête agricole tout en préservant les surfaces dans les Bas.

6.2.4 Quelle « compensation théorique » des émissions de GES par une augmentation de 4‰ du stock de COS des sols agricoles dans l'horizon 0-30 cm ?

A La Réunion, le stock total de carbone organique dans l'horizon 0-30 cm des sols agricoles a été estimé dans cette étude à environ 7.55 Mt C. Une augmentation de 4‰ par an de ce stock, correspondant à 30 kt C (soit 111 kt CO_2eq), compenserait à peine plus de 2 % les émissions de GES de l'île (4762 kt CO_2eq en 2017 d'après les données de (CITEPA, 2019)) (Figure 6.5). A titre de comparaison avec la métropole, d'après Pellerin et al. (2019), une augmentation de 4‰ par an du stock de COS des sols (hors surfaces artificialisées) de métropole, soit 3,58 Gt de C (13,4 Gt de CO_2eq) dans l'horizon 0-30 cm, compenserait de l'ordre de 12% des émissions annuelles françaises de GES (458 MtCO_2eq en 2016).

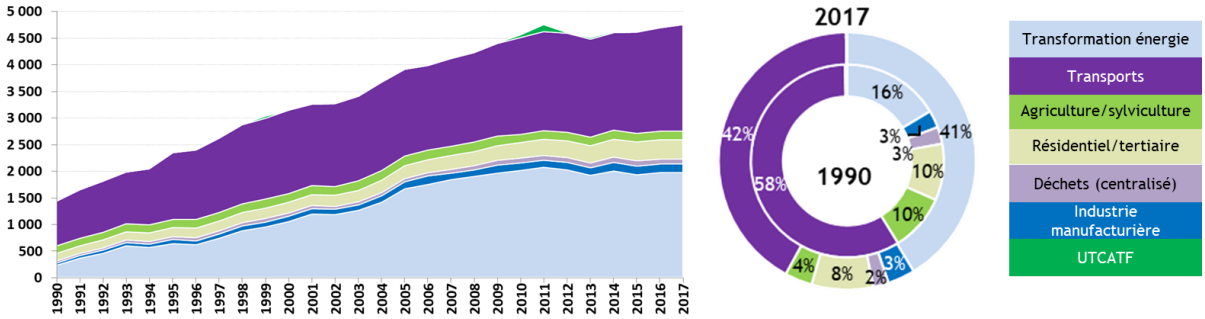


FIGURE 6.5 : EMISSIONS DE GES (CO2, CH4, N2O, HFC, SF6) DE 1990 A 2017 A LA REUNION, EXTRAIT DE CITEPA (2019).

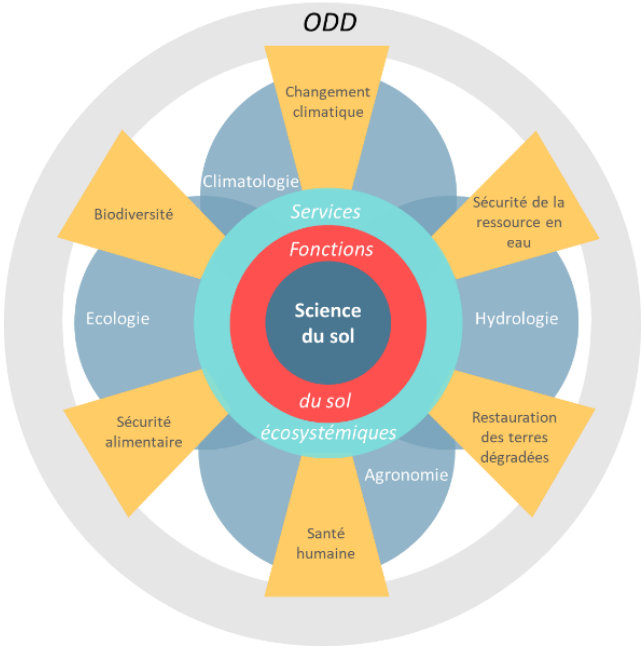
Toutefois, en considérant uniquement le secteur Agriculture (avec UTCATF) de La Réunion qui ne représente que 4% des émissions de GES du territoire en 2017 (CITEPA, 2019), une augmentation de 4‰ par an du stock de COS pourrait compenser de l'ordre de 63 % des émissions de GES de ce secteur (soit 172 kt CO2eq selon CITEPA (2019)) (Figure 6.5). Les estimations des émissions de GES du secteur agricole présentées dans le chapitre 5 étant plus élevées (304 056 tCO_2eq (Grondin, 2012) et 297 280 tCO_2eq (Louis, 2013)), une augmentation de 4‰ par an du stock de COS pourrait compenser environ 37 % des émissions de GES du secteur agricole selon les estimations de ces deux études. Cependant, quelques soient les valeurs considérées, ces données montrent que le stockage additionnel de carbone dans les sols agricoles de La Réunion ne peut en aucun cas compenser les émissions de GES de l'île qui sont principalement issues des secteurs de l'énergie et des transports. Le stockage additionnel de carbone organique dans les sols n'est donc qu'un levier parmi d'autres pour lutter contre le changement climatique dû aux émissions anthropiques.

CONCLUSION GENERALE

La base de données préexistante d'analyses de sol de La Réunion, couplée à la spectroscopie infrarouge a permis d'obtenir des résultats intéressants (1) pour cartographier des unités pédologiques, (2) quantifier et spatialiser les stocks de COS des sols agricoles et (3) d'évaluer l'impact de changements d'usages agricoles sur ces stocks de COS dans le milieu volcanique tropical spatialement hétérogène qu'est La Réunion. Bien que ces premiers résultats dans l'étude des stocks de COS des sols agricoles réunionnais présentent des limites, cette première étape a également soulevé des perspectives de recherches intéressantes, notamment en termes de mesures et de suivi, sur les stocks de COS à La Réunion.

Ce travail de thèse a permis de montrer que les sols agricoles de La Réunion ont des stocks de COS très élevés bien que certains modes d'usages semblent présenter des risques de déstockage du COS. Dans ce contexte et dans le cadre de l'Initiative 4p1000, la priorité est donc avant tout, de ne pas déstocker les stocks de COS élevés des sols agricoles. La préservation de ces sols, notamment les Andosols caractérisés par des stocks de COS très élevés et possiblement vulnérables aux changements d'usages des terres agricoles, est donc essentiel dans le cadre d'une politique d'atténuation au changement climatique.

Toutefois, si l'initiative 4p1000 a l'avantage de mettre en avant les sols agricoles car ils sont une partie de la solution pour lutter contre le changement climatique, ce slogan ne doit en aucun cas masquer le fait que les émissions de GES issues de la combustion d'énergies fossiles devraient être drastiquement réduites en parallèle. D'autre part, l'initiative 4p1000 promeut également l'augmentation des stocks de COS pour assurer la sécurité alimentaire et s'adapter au changement climatique. Le stockage du COS présente effectivement de nombreux co-bénéfices puisqu'augmenter la quantité de MOS c'est améliorer diverses fonctions du sol qui lui permettent d'assurer divers services écosystémiques et de répondre à de nombreux objectifs de développement durable.



LES SOLS AU CŒUR DES OBJECTIFS DE DEVELOPPEMENT DURABLE, D'APRES KEESSTRA ET AL. (2016)

Cependant, la gestion la plus opérationnelle des stocks de COS doit être réalisée à l'échelle territoriale où l'enjeu est un aménagement cohérent du territoire incluant des actions en faveur de l'initiative 4p1000 afin de prendre en compte le stockage du COS mais également l'ensemble des services rendus par les sols. Toutefois, la vigilance doit prévaloir face à la possibilité de certains écueils tels que l'incohérence des différents outils de planification (SRADDET, SCOT, PLU, SRCE, PCAET), la spécialisation des territoires dans le stockage/déstockage du COS, ou encore une organisation basée une logique économique ou compensatrice. La préservation des sols est donc indispensable mais doit être combiné à l'augmentation de la résilience des systèmes agricoles dans les domaines économique et social pour aller dans le sens de la nécessaire transition politique, climatique, écologique et agricole.

BIBILIOGRAPHIE

Albrecht, A., Brossard, M., Chotte, J.-L., Feller, C., 1992. Les stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique (Petites Antilles) 14.

Allo, M., Albrecht, A., Légier, P., Gogé, F., 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., in: Abstract Book Pedometrics 2017. Presented at the Pedometrics 2017, Wageningen: Wageningen University and Research Centre, ISRIC, Wageningen (Pays-Bas)., p. 19.

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

Allo, M., Vigne, M., 2015. Estimations des productions et des besoins de biomasse d'origine agricole à l'échelle territoriale : Cas des interactions entre agriculture et élevage à la Réunion. (Mémoire fin d'études Ingénieur Agronome). Bordeaux Sciences Agro.

Arrouays, D., Feller, C., Jolivet, C., Saby, N., Andreux, F., Bernoux, M., 2003. Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps. Étude et Gestion des Sols 10.

Arrouays, D., Horn, R., 2019. Soil Carbon - 4 per Mille - an introduction. Soil and Tillage Research 188, 1–2. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.008

Baize, D., 2016. Petit lexique de pédologie., Quae. ed.

Balesdent, J., Arrouays, D., 1999. Usage des terres et stockage de carbone dans les sols du territoire français. Une estimation des flux nets annuels pour la période 1900-1999. C.R.Acad.Agric.Fr 85, p265-277.

Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Chadoeuf, J., Cornu, S., Derrien, D., Fekiacova, Z., Hatté, C., 2018. Atmosphere–soil carbon transfer as a function of soil depth. Nature 559, 599–602. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0328-3

Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Chadoeuf, J., Cornu, S., Fekiacova, Z., Fontaine, S., Guenet, B., Hatté, C., 2017. Renouvellement du carbone profond des sols cultivés : une estimation par compilation de données isotopiques. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 10.

Barbet-Massin, V., Grimaud, P., Michon, A., Thomas, P., 2004. Guide technique pour la création, la gestion et la valorisation des prairies à la Réunion.

Barré, P., Angers, D.A., Basile-Doelsch, I., Bispo, A., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Derrien, D., Eglin, T.K., Pellerin, S., 2017. Ideas and perspectives: Can we use the soil carbon saturation deficit to quantitatively assess the soil carbon storage potential, or should we explore other strategies? Biogeosciences Discuss. 1–12. https://doi.org/10.5194/bg-2017-395

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

Barthès, B.G., Kouakoua, E., Larré-Larrouy, M.-C., Razafimbelo, T.M., de Luca, E.F., Azontonde, A., Neves, C.S.V.J., de Freitas, P.L., Feller, C.L., 2008. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. Geoderma 143, 14–25. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.10.003

Basile-Doelsch, I., Amundson, R., Stone, W.E.E., Masiello, C.A., Bottero, J.Y., Colin, F., Masin, F., Borschneck, D., Meunier, J.D., 2005a. Mineralogical control of organic carbon dynamics in a volcanic ash soil on La Reunion. European Journal of Soil Science 0, 050912034650042. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00703.x

Basile-Doelsch, I., Amundson, R., Stone, W.E.E., Masiello, C.A., Bottero, J.Y., Colin, F., Masin, F., Borschneck, D., Meunier, J.D., 2005b. Mineralogical control of organic carbon dynamics in a

volcanic ash soil on La Réunion. European Journal of Soil Science 56, 689–703. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00703.x
Basile-Doelsch, I., Balesdent, J., Rose, J., 2015. Are Interactions between Organic Compounds and Nanoscale Weathering Minerals the Key Drivers of Carbon Storage in Soils? Environ. Sci. Technol. 49, 3997–3998. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00650
Basile-Doelsch, I., Brun, T., Borschneck, D., Masion, A., Marol, C., Balesdent, J., 2009. Effect of landuse on organic matter stabilized in organomineral complexes: A study combining density fractionation, mineralogy and δ13C. Geoderma 151, 77–86. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.008
Batjes, N.H., 2016. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. Geoderma 269, 61–68. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.034
Batjes, N.H., 2011. Soil organic carbon stocks under native vegetation – Revised estimates for use with the simple assessment option of the Carbon Benefits Project system. Agriculture, Ecosystems & Environment 142, 365–373. https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.06.007
Batjes, N.H., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science 47, 151–163. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x
Baveye, P.C., Berthelin, J., Tessier, D., Lemaire, G., 2018. The "4 per 1000" initiative: A credibility issue for the soil science community? Geoderma 309, 118–123. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.005
Beare, M.H., McNeill, S.J., Curtin, D., Parfitt, R.L., Jones, H.S., Dodd, M.B., Sharp, J., 2014. Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: a New Zealand case study. Biogeochemistry 120, 71–87. https://doi.org/10.1007/s10533-014-9982-1
Beerling, D.J., Leake, J.R., Long, S.P., Scholes, J.D., Ton, J., Nelson, P.N., Bird, M., Kantzas, E., Taylor, L.L., Sarkar, B., Kelland, M., DeLucia, E., Kantola, I., Müller, C., Rau, G., Hansen, J., 2018. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. Nature Plants 4, 138–147. https://doi.org/10.1038/s41477-018-0108-y
Bellon-Maurel, V., Fernandez-Ahumada, E., Palagos, B., Roger, J.-M., McBratney, A., 2010. Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy. TrAC Trends in Analytical Chemistry 29, 1073–1081. https://doi.org/10.1016/j.trac.2010.05.006
Bernoux, M., Schiettecatte, L.-S., Tinlot, M., Bockel, L., Branca, G., 2016. (EX-ACT) Technical Guidelines for Version 7. FAO.
Blanchart, E., Bernoux, M., 2005. DETERMINANTS DES STOCKS DE CARBONE DES SOLS DES PETITES ANTILLES (MARTINIQUE, GUADELOUPE). ALTERNATIVES DE SEQUESTRATION DU CARBONE ET SPATIALISATION DES STOCKS ACTUELS ET SIMULES.
Blanfort, V., Demenois, J., 2019. Changements climatiques et agriculture : quels enjeux, quels impacts aujourd'hui et demain ? Diplomatie 49.
Boulaine, J., 1997. Histoire abrégée de la Science des Sols. Étude et Gestion des Sols 11.
Boulet, J.-C., Roger, J.-M., 2016. CheMOOCs : Grain 1 : Définitions.
Bradford, M.A., Wieder, W.R., Bonan, G.B., Fierer, N., Raymond, P.A., Crowther, T.W., 2016. Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change. Nature Clim Change 6, 751–758. https://doi.org/10.1038/nclimate3071
Brossard, M., Barthès, B., Perrin, A.-S., Courte, A., Fujisaki, K., Kouakoua, E., Cambou, A., Moulin, P., Beaucher, E., Sarrazin, M., 2018. Stocks de carbone des sols de Guyane : mesure et distribution (2016-2018).
Cambou, A., Shaw, R.K., Huot, H., Vidal-Beaudet, L., Hunault, G., Cannavo, P., Nold, F., Schwartz, C., 2018. Estimation of soil organic carbon stocks of two cities, New York City and Paris. Science of The Total Environment 644, 452–464. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.322
Chabalier, P.-F., van de Kerchove, V., Saint Macary, H., 2006. Guide de la fertilisation organique à La Réunion. CIRAD.

Chabanel, C., Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France), 2016. PCAET, comprendre, construire et mettre en oeuvre: Plan climat-air-énergie territorial : découvrez tout ce qu'il faut savoir sur l'évolution réglementaire des plans climat. ADEME, Angers.

Chambre d'agriculture Réunion, CIRAD, R., 2008. Manuel de l'utilisateur Ferti-RUN 2008.

Chang, C.-W., Laird, D.A., Mausbach, M.J., Hurburgh, C.R., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. Soil Science Society of America Journal 65, 480–490. https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652480x

Chenu, C., 2016. Sols et carbone : Stocker du carbone, enrichir les sols en matière organique.. Le projet 4 pour mille.

Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., Balesdent, J., 2019. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. Soil and Tillage Research 188, 41–52. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011

Chenu, C., Klumpp, K., Bispo, A., Angers, D., Colnenne, C., Metay, A., 2014. Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. Innovations Agronomiques 37, 23–37.

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

Chopart, J.L., Mézo, L.L., Brossier, J.L., Hoareau, C.L., 2008. Profondeur du système racinaire de la canne à sucre à la Réunion. (var. 570, repousse).

Chotte, J.-L., Aynekulu, E., Cowie, A., Campbell, E., Vlek, P., Lal, R., Kapović-Solomun, M., von Maltitz, G., Kust, G., Barger, N., Vargas, R., Gastrow, S., 2019. Réaliser les avantages liés au carbone découlant des pratiques de gestion durable des terres : lignes directrices pour l'évaluation du carbone organique du sol dans le contexte de la planification et de la surveillance de la neutralité en matière de dégradation des terres Un rapport de l'Interface science-politique. Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD), Bonn, Allemagne.

CIRAD, R., Chambre d'agriculture Réunion, 2015. Fiche technique de l'Ananas.

Citeau, L., Bispo, A., Bardy, M., King, D., 2008. Gestion durable des sols, QUAE. ed.

CITEPA, 2019. Source CITEPA / format Outre-mer - juillet 2019 / CITEPA_Outre-mer_Reunion.xlsx/CO2e.

Colomb, V., Bernoux, M., Bockel, L., Chotte, J.-L., Martin, S., Martin-Phipps, C., MOUSSET, J., Tinlot, M., Touchemoulin, O., 2012. Revue des calculateurs GES pour l'agriculture et la forêt. Guide d'aide au choix et à l'utilisation des outils pour les évaluations territoriales. ADEME-FAO-IRD.

Colomb, V, Colomb, Vincent, Martel, M., Guadeloupe, A., 2012. Bilan des émissions de Gaz à Effet de Serre de l'agriculture et la forêt pour le territoire de la Guadeloupe. ADEME-FAO-IRD, Guadeloupe.

Colomb, V., Martin, S., Bernoux, M., Bockel, L., 2013a. Bilan GES "Agriculture à l'Echelle Régionale": comparaison des outils développés par la FAO et l'ADEME. Projet AGER. ADEME-FAO-IRD.

Colomb, V., Touchemoulin, O., Bockel, L., Chotte, J.-L., Martin, S., Tinlot, M., Bernoux, M., 2013b. Selection of appropriate calculators for landscape-scale greenhouse gas assessment for agriculture and forestry. Environmental Research Letters 8, 015029. https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015029

COSMOS : Une odyssée à travers l'univers, 2014. . Un monde libéré.

Crowther, T.W., Todd-Brown, K.E.O., Rowe, C.W., Wieder, W.R., Carey, J.C., Machmuller, M.B., Snoek, B.L., Fang, S., Zhou, G., Allison, S.D., Blair, J.M., Bridgham, S.D., Burton, A.J., Carrillo, Y., Reich, P.B., Clark, J.S., Classen, A.T., Dijkstra, F.A., Elberling, B., Emmett, B.A., Estiarte, M., Frey, S.D., Guo, J., Harte, J., Jiang, L., Johnson, B.R., Kröel-Dulay, G., Larsen, K.S., Laudon, H., Lavallee, J.M., Luo, Y., Lupascu, M., Ma, L.N., Marhan, S., Michelsen, A., Mohan, J., Niu, S., Pendall, E., Peñuelas, J., Pfeifer-Meister, L., Poll, C., Reinsch, S., Reynolds, L.L., Schmidt, I.K., Sistla, S., Sokol, N.W., Templer, P.H., Treseder, K.K., Welker, J.M., Bradford, M.A., 2016. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. Nature 540, 104–108. https://doi.org/10.1038/nature20150

DAAF La Réunion, 2016. Agreste, numéro100. La culture des légumes : chou, carotte, salade, tomate. Premiers résultats de l'enquête statistique réalisée en 2014 auprès de 500 producteurs maraîchers à La Réunion.

DAAF La Réunion, 2015. La protection du foncier agricole à La Réunion. Agreste La Réunion.

DAAF La Réunion, 2012. Elements descriptifs des exploitations agricoles - 06/2012 [WWW Document]. URL http://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/Telechargement-donnees-SIG (accessed 3.1.19).

de Vries, W., 2018. Soil carbon 4 per mille: a good initiative but let's manage not only the soil but also the expectations. Geoderma 309, 111–112. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.023

Delvaux, B., Herbillon, A.J., Vielvoye, L., Mestdagh, M.M., 1990. Surface properties and clay mineralogy of hydrated halloysitic soil clays. II: Evidence for the presence of halloysite/smectite (H/Sm) mixed-layer clays. Clay miner. 25, 141–160. https://doi.org/10.1180/claymin.1990.025.2.02

Demattê, J.A.M., da Silva Terra, F., 2014. Spectral pedology: A new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations. Geoderma 217–218, 190–200. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.11.012

Denaix, L., 1989. Etude des constituants et de la micro-organisation d'andosols de la Réunion. Laboratoire des Sols INRA de Versailles, La Réunion.

Derrien, D., Dignac, M.-F., Basile-Doelsch, I., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Freschet, G.T., Garnier, P., Guenet, B., Hedde, M., Klumpp, K., Lashermes, G., Maron, P.-A., Nunan, N., Roumet, C., 2016. Stocker du carbone dans les sols : Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ? Etude et Gestion des Sols 23, p193-223.

Dimassi, B., Cohan, J.-P., Labreuche, J., Mary, B., 2013. Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France. Agriculture, Ecosystems & Environment 169, 12–20. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.01.012

Don, A., Schumacher, J., Freibauer, A., 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis: SOIL ORGANIC CARBON AND LAND-USE CHANGE. Global Change Biology 17, 1658–1670. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x

Dupuy, S., 2018. Carte d'occupation du sol 2017 Spot6-7 (niveau 3) - CIRAD — AWARE [WWW Document]. URL http://aware.cirad.fr/layers/geonode%3Aclassif_gabir_2017_postclas_code3_cor (accessed 9.6.19).

Dupuy, S., 2017. Fiche complémentaire de la couche « Carte d'occupation du sol 2017 à la Réunion » 9.

Egli, M., Nater, M., Mirabella, A., Raimondi, S., Plötze, M., Alioth, L., 2008. Clay minerals, oxyhydroxide formation, element leaching and humus development in volcanic soils. Geoderma 143, 101–114. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.10.020

Eglin, T., Ciais, P., Piao, S.L., Barre, P., Bellassen, V., Cadule, P., Chenu, C., Gasser, T., Koven, C., Reichstein, M., Smith, P., 2010. Historical and future perspectives of global soil carbon response to climate and land-use changes. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology 62, 700–718. https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00499.x

Elith, J., Leathwick, J.R., Hastie, T., 2008. A working guide to boosted regression trees. J Anim Ecology 77, 802–813. https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x

FAO, 2017. Soil Organic Carbon: the hidden potential. FAO, Rome.

FAO, 2016. The agriculture sectors in the intended nationally determined contributions - Analysis (No. 62). FAO, Rome.

FAO, ITPS, 2018. Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Technical Report. Rome.

Feder, F., Bourgeon, G., 2009. Mise à jour de la carte des sols de l'île de la Réunion. EGS 16, 85–99.

Feng, W., Plante, A.F., Six, J., 2013. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. Biogeochemistry 112, 81–93. https://doi.org/10.1007/s10533-011-9679-7

Fillols, E., Chabalier, P.-F., 2007. Guide de la fertilisation de la canne à sucre à La Réunion. CIRAD.

Finkl, W.C., 2008. TROPICAL SOILS, in: Encyclopedia of Soil Science.

Fontaine, S., Barot, S., Barré, P., Bdioui, N., Mary, B., Rumpel, C., 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. Nature 450, 277–280. https://doi.org/10.1038/nature06275

Fournier, P., Cambournac, T., 2013. Bilan des exploitations enquêtées 60.

Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Hauck, J., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Bakker, D.C.E., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Anthoni, P., Barbero, L., Bastos, A., Bastrikov, V., Becker, M., Bopp, L., Buitenhuis, E., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L.P., Currie, K.I., Feely, R.A., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Goll, D.S., Gruber, N., Gutekunst, S., Harris, I., Haverd, V., Houghton, R.A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A.K., Joetzjer, E., Kaplan, J.O., Kato, E., Klein Goldewijk, K., Korsbakken, J.I., Landschützer, P., Lauvset, S.K., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Marland, G., McGuire, P.C., Melton, J.R., Metzl, N., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S.-I., Neill, C., Omar, A.M., Ono, T., Peregon, A., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Séférian, R., Schwinger, J., Smith, N., Tans, P.P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F.N., van der Werf, G.R., Wiltshire, A.J., Zaehle, S., 2019. Global Carbon Budget 2019. Earth Syst. Sci. Data 11, 1783–1838. https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019

Fujisaki, K., Chevallier, T., Chapuis-Lardy, L., Albrecht, A., Razafimbelo, T., Masse, D., Ndour, Y.B., Chotte, J.-L., 2018. Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis. Agriculture, Ecosystems & Environment 259, 147–158. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.008

Gelaw, A.M., Singh, B.R., Lal, R., 2015. Organic Carbon and Nitrogen Associated with Soil Aggregates and Particle Sizes Under Different Land Uses in Tigray, Northern Ethiopia. Land Degradation & Development 26, 690–700. https://doi.org/10.1002/ldr.2261

Genot, V., Bock, L., Dardenne, P., Collinet, G., 2014. L'intérêt de la spectroscopie proche infrarouge en analyse de terre (synthèse bibliographique). Biotechnol. Agron. Soc. Environ 247–261.

Gense, C., 1976. Altération des roches volcaniques basiques sur la côte orientale de Mdagascar et à la Réunion. Université Louis Pasteur Strasbourg.

Gobat, Aragno, Matthey, 2003. Le sol vivant. Bases de pédologie - Biologie des sols. 3ème édition revue et augmentée. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Gobrecht, A., Roger, J.-M., Bellon-Maurel, V., 2014. Major Issues of Diffuse Reflectance NIR Spectroscopy in the Specific Context of Soil Carbon Content Estimation, in: Advances in Agronomy. Elsevier, pp. 145–175. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420225-2.00004-2

Gogé, F., 2014. Préparation, Exploration de la base d'analyse des sols du laboratoire du CIRAD Saint Denis Application CARBONE. CIRAD, la Réunion.

Grim, R.E., 1968. Clay Mineralogy [WWW Document]. Infoscience. URL https://infoscience.epfl.ch/record/27086 (accessed 9.12.19).

Grondin, S., 2012. Inventaire régional des émissions de gaz à effet de serre pour l'île de La Réunion en 2010. Résultats et tendances. 72.

Guo, L.B., Gifford, R.M., 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Global Change Biol 8, 345–360. https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x

Han, P., Zhang, W., Wang, G., Sun, W., Huang, Y., 2016. Changes in soil organic carbon in croplands subjected to fertilizer management: a global meta-analysis. Sci Rep 6, 27199. https://doi.org/10.1038/srep27199

Hassink, J., 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles 11.

Heil, J., Häring, V., Marschner, B., Stumpe, B., 2019. Advantages of fuzzy k-means over k-means clustering in the classification of diffuse reflectance soil spectra: A case study with West African soils. Geoderma 337, 11–21. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.004

Herbillon, A.J., Delvaux, B., 1990. Halloysites from tropical ash-derived soils as minerals at the border between high activity and low activity clays., in: Proc. IXth Inst. Soil Classification Workshop, Alma Ata, USSR, 11-19 Sept. 1988. Presented at the Proc. IXth Inst. Soil Classification Workshop,", USSR? Alma Ata (du 11/09/88 au 19/09/88), pp. 320–329.

Hidalgo, C., Etchevers, J.D., Martínez-Richa, A., Yee-Madeira, H., Calderon, H.A., Vera-Graziano, R., Matus, F., 2010. Mineralogical characterization of the fine fraction (<2µm) of degraded volcanic soils and tepetates in Mexico. Applied Clay Science, Fourth Mediterranean Clay Meeting 49, 348–358. https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.007

Hijmans, R.J., Phillips, S., Leathwick, J., Elith, J., 2017. dismo: Species Distribution Modeling. R package version 1.1-4. https://CRAN.R-project.org/package=dismo.

H.M.-L., 1948. Soil Rejuvenation in Mauritius. International Sugar Journal 50.

Houghton, R.A., 2013. The emissions of carbon from deforestation and degradation in the tropics: past trends and future potential. Carbon Management 4, 539–546. https://doi.org/10.4155/cmt.13.41

Houghton, R.A., House, J.I., Pongratz, J., van der Werf, G.R., DeFries, R.S., Hansen, M.C., Le Quéré, C., Ramankutty, N., 2012. Carbon emissions from land use and land-cover change. Biogeosciences 9, 5125–5142. https://doi.org/10.5194/bg-9-5125-2012

IPCC, 2019. Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. IPCC.

IPCC, 2018. GLOBAL WARMING OF 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. IPCC.

IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 3: Consistent Representation of Lands. Authors: Kathryn Bickel (USA) and Gary Richards (Australia) Michael Köhl (Germany) and Ricardo Leonardo Vianna Rodrigues (Brazil) Contributing Author: Goran Stahl (Sweden). IPCC.

IUSS Working group WRB, 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.

Iyoda, F., Hayashi, S., Arakawa, S., John, B., Okamoto, M., Hayashi, H., Yuan, G., 2012. Synthesis and adsorption characteristics of hollow spherical allophane nano-particles. Applied Clay Science 56, 77–83. https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.11.025

Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 1995. Characterization and analysis of soils using mid-infrared partial least-squares .2. Correlations with some laboratory data. Soil Res. 33, 637–650. https://doi.org/10.1071/sr9950637

Janik, L.J., Skjemstad, J.O., Raven, M.D., 1995. Characterization and analysis of soils using mid-infrared partial least-squares .1. Correlations with XRF-determined major-element composition. Soil Res. 33, 621–636. https://doi.org/10.1071/sr9950621

Jenny, H., 1941. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. Dover, New York.

Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., 2000. THE VERTICAL DISTRIBUTION OF SOIL ORGANIC CARBON AND ITS RELATION TO CLIMATE AND VEGETATION. Ecological Applications 10, 423–436. https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2

Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B., Righi, D., Delvaux, B., 2005. Halloysite clay minerals – a review. Clay Minerals 40, 383–426. https://doi.org/10.1180/0009855054040180

Keesstra, S.D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J.N., Pachepsky, Y., van der Putten, W.H., Bardgett, R.D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B., Fresco, L.O., 2016. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. SOIL 2, 111–128. https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016

Keiluweit, M., Bougoure, J.J., Nico, P.S., Pett-Ridge, J., Weber, P.K., Kleber, M., 2015. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. Nature Clim Change 5, 588–595. https://doi.org/10.1038/nclimate2580

Kon Kam King, J., Granjou, C., Fournil, J., Cecillon, L., 2018. Soil sciences and the French 4 per 1000 Initiative—The promises of underground carbon. Energy Research & Social Science 45, 144–152. https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.06.024

Lacquement, F., Nehlig, P., 2014. Carte géologique des cirques du Massif du Piton des Neiges (Île de La Réunion, France) 44.

Le Quéré, C., Andrew, R.M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P.A., Korsbakken, J.I., Peters, G.P., Canadell, J.G., Arneth, A., Arora, V.K., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L.P., Ciais, P., Doney, S.C., Gkritzalis, T., Goll, D.S., Harris, I., Haverd, V., Hoffman, F.M., Hoppema, M., Houghton, R.A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A.K., Johannessen, T., Jones, C.D., Kato, E., Keeling, R.F., Goldewijk, K.K., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Metzl, N., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S., Neill, C., Olsen, A., Ono, T., Patra, P., Peregon, A., Peters, W., Peylin, P., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rocher, M., Rödenbeck, C., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sutton, A., Tans, P.P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F.N., van der Laan-Luijkx, I.T., van der Werf, G.R., Viovy, N., Walker, A.P., Wiltshire, A.J., Wright, R., Zaehle, S., Zheng, B., 2018. Global Carbon Budget 2018. Earth Syst. Sci. Data 10, 2141–2194. https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018

Le, S., Josse, J., Husson, F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. Journal of Statistical Software, 25(1), 1-18. 10.18637/jss.v025.i01.

Legros, J.-P., 2007. Les grands sols du monde. PPUR, Lausanne.

Lehmann, J., Kleber, M., 2015. The contentious nature of soil organic matter. Nature 528, 60–68. https://doi.org/10.1038/nature16069

Levard, C., Doelsch, E., Basile-Doelsch, I., Abidin, Z., Miche, H., Masion, A., Rose, J., Borschneck, D., Bottero, J.-Y., 2012. Structure and distribution of allophanes, imogolite and proto-imogolite in volcanic soils. Geoderma 183–184, 100–108. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.015

Liaw, A., Wiener, M., 2002. Classification and Regression by randomForest. R News 2(3), 18--22.

Louis, C., 2013. Rapport d'étude "Bilan Carbone" Territoire du Conseil Général de La Réunion". Conseil Général de La Réunion.

Lutfalla, S., Cécillon, L., Barré, P., 2018. Les sols, facteurs d'attenuation ou, au contraire, d'aggravation du changement climatique. Annales des Mines - Responsabilité et environnement 19-23.

Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., Hornik, K., 2019. cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions. R package version 2.0.8.

Martin, J., Maillary, L., Dutripon, S., Chaulet, G., Antoir, J., Masson, J., 2016. AFPP– 23e conférence du COLUMA. Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. Dijon – 6, 7 et 8 décembre 2016 l'IFT herbicides canne à sucre à La Réunion : la baisse semble amorcée. 11.

Mathieu, C., Lozet, J., 2011. Dictionnaire encyclopédique de science du sol, TEC & DOC. ed. LAVOISIER.

Mathieu, J.A., Hatté, C., Balesdent, J., Parent, É., 2015. Deep soil carbon dynamics are driven more by soil type than by climate: a worldwide meta-analysis of radiocarbon profiles. Glob Change Biol 21, 4278–4292. https://doi.org/10.1111/gcb.13012

Mayer, L.M., 1994. Relationships between mineral surfaces and organic carbon concentrations in soils and sediments. Chemical Geology 114, 347–363. https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90063-9

McBratney, A., Koppi, T., Field, D.J., 2016. Radical soil management for Australia: A rejuvenation process. Geoderma Regional 7, 132–136. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.02.001

McNally, S.R., Beare, M.H., Curtin, D., Meenken, E.D., Kelliher, F.M., Calvelo Pereira, R., Shen, Q., Baldock, J., 2017. Soil carbon sequestration potential of permanent pasture and continuous cropping soils in New Zealand. Glob Change Biol 23, 4544–4555. https://doi.org/10.1111/gcb.13720

MétéoFrance, 2015. Le changement climatique à La Réunion [WWW Document]. MétéoFrance La Réunion. URL http://www.meteofrance.re/climat/changement-climatique#tempe

Milne, E., Neufeldt, H., Rosenstock, T., Smalligan, M., Cerri, C.E., Malin, D., Easter, M., Bernoux, M., Ogle, S., Casarim, F., Pearson, T., Bird, D.N., Steglich, E., Ostwald, M., Denef, K., Paustian, K., 2013. Methods for the quantification of GHG emissions at the landscape level for developing

countries in smallholder contexts. Environ. Res. Lett. 8, 015019. https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015019

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

Minasny, B., McBratney, A.B., Hong, S.Y., Sulaeman, Y., Kim, M.S., Zhang, Y.S., Kim, Y.H., Han, K.H., 2012. Continuous rice cropping has been sequestering carbon in soils in Java and South Korea for the past 30 years. Global Biogeochemical Cycles 26. https://doi.org/10.1029/2012GB004406

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2010. RGA (Recensement Agricole) - agreste - La statistique, l'évaluation et la prospective agricole - Résultats - Données chiffrées [WWW Document]. URL http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/structure-des-exploitations-964/recensement-agricole-2010/resultats-donnees-chiffrees/ (accessed 10.10.19).

Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, 2016. Atlas régional de l'occupation des sols en France (CLC) | Données et études statistiques. Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer.

Mizota, C., Reeuwijk, L.P. van, 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions.

Nehlig, P., Bucelle, M., 2005. Connaissance géologique de La Réunion. Livret de l'enseignant., BRGM. ed.

Nicolardot, B., Germon, J.-C., 2008. Emissions de méthane (CH4) et d'oxydes d'azote (N2O et NOx) par les sols cultivés - Aspects généraux et effet du non travail du sol. Etude et Gestion des Sols 15, 171–182.

Nocita, M., Stevens, A., van Wesemael, B., Aiktenhead, M., Bachmann, M., Barthès, B., Ben Dor, E., Brown, D.J., Clairotte, M., Csorba, A., Dardenne, P., Demattê, J.A.M., Genot, V., Guerrero, C., Knadel, M., Montanarella, J., Noon, C., Ramirez-Lopez, L., Robertson, J., Sakai, H., Soriano-Disla, J.M., Shepherd, K.D., Stenberg, B., Towett, E.K., Vargas, R., Wetterlind, J., 2015. Chapter 4: Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring, in: Advances in Agronomy. Elsevier Inc.

Norrish, K., 1995. An unusual fibrous halloysite, in: Clays Control the Environment : Proceedings of the 10th International Clay Conference 1993. (G.J. Churchman, R.W. Fitzpatrick & R.A. Eggleton, editors), Adelaide, Australia., p. Pp. 275-284.

Olafur, A., 2008. ANDOSOLS, in: Encyclopedia of Soil Science.

Parfitt, R.L., Whitton, J.S., Theng, B.K.G., 2001. Surface reactivity of A horizons towards polar compounds estimated from water adsorption and water content. Soil Research 39, 1105. https://doi.org/10.1071/SR00059

Parikh, S.J., Goyne, K.W., Margenot, A.J., Mukome, F.N.D., Calderón, F.J., 2014. Soil Chemical Insights Provided through Vibrational Spectroscopy, in: Advances in Agronomy. Elsevier, pp. 1–148. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800132-5.00001-8

Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J.P., Chenu, C., Colnenne-David, C., De Cara, S., Delame, N., Doreau, M., Dupraz, P., Faverdin, P., Garcia-Launay, F., Hassouna, M., Hénault, C., Jeuffroy, M.H., Klumpp, K., Metay, A., Moran, D., Recous, S., Samson, E., Savini, I., Pardon, L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? otentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. INRA, France.

Pellerin, S., Bamière, L., Launay, C., Martin, R., Schiavo, M., Angers, D., Augusto, L., Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Bellassen, V., Cardinael, R., Cécillon, L., Ceschia, E., Chenu, C., Constantin, J., Darroussin, J., Delacote, P., Delame, N., Gastal, F., Gilbert, D., Graux, A.I., Guenet, B., Houot, S., Klumpp, K., Letort, E., Martin, M., Menasseri, S., Mézière, D., Morvan, T., Mosnier, C., Roger-Estrade, J., Saint-André, L., Sierra, J., Thérond, O., Viaud, V., Grateau, R., Le Perchec, S., Savini,

I., Réchauchère, O., 2019. Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif de 4 pour 1000 et à quel coût ? INRA, France.

Peltre, C., Christensen, B.T., Dragon, S., Icard, C., Kätterer, T., Houot, S., 2012. RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. Soil Biology and Biochemistry 52, 49–60. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.03.023

Peñuelas, J., Ciais, P., Canadell, J.G., Janssens, I.A., Fernández-Martínez, M., Carnicer, J., Obersteiner, M., Piao, S., Vautard, R., Sardans, J., 2017. Shifting from a fertilization-dominated to a warming-dominated period. Nat Ecol Evol 1, 1438–1445. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0274-8

Perret, S., 1992. Etude de propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. Facteurs naturels et anthropiques d'évolution des horizons culturaux, implications agronomiques et écologiques. ENSA Montpellier, Montpellier.

Poeplau, C., Don, A., 2013. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. Geoderma 192, 189–201. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.003

Poulenard, J., Herbillon, A.J., 2000. Sur l'existence de trois catégories d'horizons de référence dans les andosols. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science 331, 651–657. https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)01467-1

Poulton, P., Johnston, J., Macdonald, A., White, R., Powlson, D., 2018. Major limitations to achieving "4 per 1000" increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. Glob Change Biol 24, 2563–2584. https://doi.org/10.1111/gcb.14066

Pouzet, D., 2002. Caractérisation chimique des sols réunionnais. CIRAD.

Powers, J.S., Corre, M.D., Twine, T.E., Veldkamp, E., 2011. Geographic bias of field observations of soil carbon stocks with tropical land-use changes precludes spatial extrapolation. Proceedings of the National Academy of Sciences 108, 6318–6322. https://doi.org/10.1073/pnas.1016774108

QGIS Development Team, 2019. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation.

Quantin, P., 1991. Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Etude de la pédogenèse initiale en milieu tropical. (Thèse de doctorat d'état en sciences naturelles). Louis Pasteur de Strasbourg.

Quantin, P., Herbillon, A.J., Janot, C., Sieffermann, G., 1984. L'halloysite blanche riche en fer de Vate (Vanuatu) : Hypothèse d'un édifice interstratifié halloysite-hisengérite. Clay Minerals 16, 629–643.

R Core Team, 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

Ramos, C.G., Querol, X., Dalmora, A.C., de Jesus Pires, K.C., Schneider, I.A.H., Oliveira, L.F.S., Kautzmann, R.M., 2017. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. Journal of Cleaner Production 142, 2700–2706. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.006

Rasse, D.P., Rumpel, C., Dignac, M.-F., 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. Plant Soil 269, 341–356. https://doi.org/10.1007/s11104-004-0907-y

Raunet, M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. CIRAD.

Reeves, J.B., 2010. Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done? Geoderma 158, 3–14. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.005

Remusat, L., Hatton, P.-J., Nico, P.S., Zeller, B., Kleber, M., Derrien, D., 2012. NanoSIMS Study of Organic Matter Associated with Soil Aggregates: Advantages, Limitations, and Combination with STXM. Environ. Sci. Technol. 46, 3943–3949. https://doi.org/10.1021/es203745k

Riquier, J., 1960. Notices sur les cartes pédologiques de reconnaissance. Ile de la Réunion.

Rodríguez Rodríguez, A., Arbelo, C.D., Guerra, J.A., Mora, J.L., Notario, J.S., Armas, C.M., 2006. Organic carbon stocks and soil erodibility in Canary Islands Andosols. CATENA 66, 228–235. https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.02.001

Roger, J.-M., Ecarnot, M., 2016. CheMOOCs : Grain 5 : Prétraitements 1.

Roger, P.A., LeMer, J., 2003. Les sols: sources et puits de méthane. ResearchGate 10, 331–345.

Rosello, V., 1984. Les sols Bruns des Hauts. Caractérisation minéralogique et microstructurale de matériaux andosoliques. Reconnaissance expérimentale de leur comportement. La Réunion.

Rumpel, C., Amiraslani, F., Chenu, C., Garcia Cardenas, M., Kaonga, M., Koutika, L.-S., Ladha, J., Madari, B., Shirato, Y., Smith, P., Soudi, B., Soussana, J.-F., Whitehead, D., Wollenberg, E., 2019. The 4p1000 initiative: Opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. Ambio. https://doi.org/10.1007/s13280-019-01165-2

Scharlemann, J.P., Tanner, E.V., Hiederer, R., Kapos, V., 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. Carbon Management 5, 81–91. https://doi.org/10.4155/cmt.13.77

Schiefer, J., Lair, G.J., Lüthgens, C., Wild, E.M., Steier, P., Blum, W.E.H., 2018. The increase of soil organic carbon as proposed by the "4/1000 initiative" is strongly limited by the status of soil development - A case study along a substrate age gradient in Central Europe. Science of The Total Environment 628–629, 840–847. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.008

Schmidt, M.W., 2012. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. Nature, 478, 49-56. https://doi.org/DOI: 10.1038/nature10386

Sebag, D., Verrecchia, E.P., Cécillon, L., Adatte, T., Albrecht, R., Aubert, M., Bureau, F., Cailleau, G., Copard, Y., Decaens, T., Disnar, J.-R., Hetényi, M., Nyilas, T., Trombino, L., 2016. Dynamics of soil organic matter based on new Rock-Eval indices. Geoderma 284, 185–203. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.025

Sierra, J., Causeret, F., Diman, J.L., Publicol, M., Desfontaines, L., Cavalier, A., Chopin, P., 2015. Observed and predicted changes in soil carbon stocks under export and diversified agriculture in the Caribbean. The case study of Guadeloupe. Agriculture, Ecosystems & Environment 213, 252–264. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.08.015

Sierra, J, Causeret, F., Diman, J.L., Publicol, M., Desfontaines, L., David, D., 2015. Evaluation régionalisée de l'EMISsion et de la séquestration de carbone dans les sols TROPicaux de Guadeloupe (TROPEMIS).

Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., Paustian, K., 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant and Soil 241, 155–176. https://doi.org/10.1023/A:1016125726789

Six, Johan, Feller, C., Denef, K., Ogle, S.M., de Moraes, J.C., Albrecht, A., 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperateand tropical soils - Effects of no-tillage. Agronomie 22, 755–775. https://doi.org/10.1051/agro:2002043

Smith, P., 2012. Soils and climate change. Current Opinion in Environmental Sustainability, Terrestrial systems 4, 539–544. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.005

Smith, P., Lutfalla, S., Riley, W.J., Torn, M.S., Schmidt, M.W.I., Soussana, J.-F., 2018. The changing faces of soil organic matter research: The changing faces of soil organic matter research. Eur J Soil Sci 69, 23–30. https://doi.org/10.1111/ejss.12500

Smith, P., Soussana, J., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D.P., Batjes, N.H., Egmond, F., McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, J.E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A., Klumpp, K., 2019. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. Glob Change Biol gcb.14815. https://doi.org/10.1111/gcb.14815

Soriano-Disla, J.M., Janik, L.J., Viscarra Rossel, R.A., Macdonald, L.M., McLaughlin, M.J., 2014. The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. Applied Spectroscopy Reviews 49, 139–186. https://doi.org/10.1080/05704928.2013.811081

Soussana, J.-F., Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlík, P., Richards, M., Wollenberg, E. (Lini), Chotte, J.-L., Torquebiau, E., Ciais, P., Smith, P., Lal, R., 2017. Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative. Soil and Tillage Research. https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.002

Stewart, C.E., Paustian, K., Conant, R.T., Plante, A.F., Six, J., 2007. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. Biogeochemistry 86, 19–31. https://doi.org/10.1007/s10533-007-9140-0

Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W., Field, D.J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A.B., Courcelles, V. de R. de, Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D.A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P.C., Chenu, C., Jastrow, J.D., Lal, R., Lehmann, J., O'Donnell, A.G., Parton, W.J., Whitehead, D., Zimmermann, M., 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. Agriculture, Ecosystems & Environment 164, 80–99. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001

Takahashi, M., Ishizuka, S., Ugawa, S., Sakai, Y., Sakai, H., Ono, K., Hashimoto, S., Matsuura, Y., Morisada, K., 2010. Carbon stock in litter, deadwood and soil in Japan's forest sector and its comparison with carbon stock in agricultural soils. Soil Science and Plant Nutrition 56, 19–30. https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00425.x

Terra, F.S., Demattê, J.A.M., Viscarra Rossel, R.A., 2018. Proximal spectral sensing in pedological assessments: vis–NIR spectra for soil classification based on weathering and pedogenesis. Geoderma 318, 123–136. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.053

Todoroff, P., Albrecht, A., Allo, M., Thuriès, L., Tillard, E., 2019. C@RUN : Séquestration de carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, modélisation spatiale et potentiels d'atténuation du changement climatique. ADEME.

Torn, M.S., Trumbore, S.E., Chadwick, O.A., Vitousek, P.M., Hendricks, D.M., 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. Nature 389, 170–173. https://doi.org/10.1038/38260

Tosser, V., Eglin, T., Bardy, M., Besson, A., 2014. Evaluation des stocks de carbone organique des sols cultivés de France. Application de la méthodologie Tier 1 du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) aux sites du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS). Etude et Gestion des Sols 21, p7-23.

Tsozué, D., Nghonda, J.P., Tematio, P., Basga, S.D., 2019. Changes in soil properties and soil organic carbon stocks along an elevation gradient at Mount Bambouto, Central Africa. CATENA 175, 251–262. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.028

Tsui, C.-C., Tsai, C.-C., Chen, Z.-S., 2013. Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan. Geoderma 209–210, 119–127. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.013

Vaksmann, M., 1987. Etude du focntionnement hydrique des andosols et des sols andiques de l'île de La Réunion. ENSA Montpellier, Montpellier.

van Groenigen, J.W., van Kessel, C., Hungate, B.A., Oenema, O., Powlson, D.S., van Groenigen, K.J., 2017. Sequestering Soil Organic Carbon: A Nitrogen Dilemma. Environ. Sci. Technol. 51, 4738–4739. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01427

VandenBygaart, A.J., 2018. Comments on soil carbon 4 per mille by Minasny et al. 2017. Geoderma 309, 113–114. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.024

Virto, I., Barré, P., Burlot, A., Chenu, C., 2012. Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. Biogeochemistry 108, 17–26. https://doi.org/10.1007/s10533-011-9600-4

Viscarra Rossel, R.A., McGlynn, R.N., McBratney, A.B., 2006. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV–vis–NIR diffuse reflectance spectroscopy. Geoderma 137, 70–82. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.07.004

Vogel, C., Mueller, C.W., Höschen, C., Buegger, F., Heister, K., Schulz, S., Schloter, M., Kögel-Knabner, I., 2014. Submicron structures provide preferential spots for carbon and nitrogen sequestration in soils. Nat Commun 5, 2947. https://doi.org/10.1038/ncomms3947

Wei, X., Shao, M., Gale, W., Li, L., 2015. Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. Sci Rep 4, 4062. https://doi.org/10.1038/srep04062

Wen, Y., Li, H., Xiao, J., Wang, C., Shen, Q., Ran, W., He, X., Zhou, Q., Yu, G., 2014. Insights into complexation of dissolved organic matter and Al(III) and nanominerals formation in soils under contrasting fertilizations using two-dimensional correlation spectroscopy and high resolution-transmission electron microscopy techniques. Chemosphere 111, 441–449. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.078

White, R.E., Davidson, B., Lam, S.K., Chen, D., 2018. A critique of the paper 'Soil carbon 4 per mille' by Minasny et al. (2017). Geoderma 309, 115–117. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.025

Yue, K., Peng, Y., Peng, C., Yang, W., Peng, X., Wu, F., 2016. Stimulation of terrestrial ecosystem carbon storage by nitrogen addition: a meta-analysis. Sci Rep 6, 19895. https://doi.org/10.1038/srep19895

Zebrowski, C., 1975. Etude d'une climatoséquence dans l'île de la Réunion. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 13, 255–278.

Zieger, A., Kaiser, K., Ríos Guayasamín, P., Kaupenjohann, M., 2018. Massive carbon addition to an organic-rich Andosol increased the subsoil but not the topsoil carbon stock. Biogeosciences 15, 2743–2760. https://doi.org/10.5194/bg-15-2743-2018

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'Ile de La Réunion.

RESUME

Le sol est un compartiment clé dans le cycle global du carbone, à la fois par son réservoir, 2 à 3 fois supérieur à celui de l'atmosphère, et par ses flux entre terres émergées et atmosphère. Dans le cadre de la mise en place de politiques d'atténuation du changement climatique, il est nécessaire de mieux connaitre les stocks de carbone organique du sol (COS) et leurs variations lors de changements d'usages. L'évaluation du stock du carbone organique du sol à l'échelle territoriale étant un enjeu méthodologique, il est proposé une méthodologie simple et à bas coût de mesure de la teneur en COS, de la densité apparente et du stock de COS par spectroscopie proche et moyen infrarouge in situ et au laboratoire. Afin de cartographier et quantifier les stocks de carbone organique des sols agricoles de La Réunion, une méthodologie de stratification du territoire en unités pédoclimatiques a été développée. La spectroscopie moyen infrarouge, couplée à une classification non supervisée, a montré son efficacité pour définir des unités pédologiques homogènes (discriminantes) selon un gradient d'altération caractéristique de la pédogenèse en zone volcanique tropicale de La Réunion. En s'appuyant sur les résultats de la stratification du territoire, le calcul des stocks de COS a montré des stocks de carbone organique très élevés pour les sols agricoles de La Réunion (sous canne à sucre, culture majoritaire de l'île, le stock moyen de COS est de 131 MgC ha^{-1}) mais vulnérables aux changements d'usages, notamment lors de changement d'usage de la canne à sucre vers une culture maraichère ou une culture d'ananas (déstockage de COS allant de -14 à -41 % du stock initial de COS). Afin d'évaluer les bilans de gaz à effet de serre (GES) de différents scénarios de changement d'usage des terres agricoles, les variations de stocks de carbone organique du sol selon les changements d'usages agricoles ont été calculées par unité pédoclimatique puis utilisés comme facteur d'émissions Tier 2 dans le calculateur EX-ACT. Les résultats des bilans de GES ont montré qu'une approche spatiale était indispensable pour évaluer les variations de stocks de carbone organique du sol selon les changements d'usages agricoles afin de ne pas modifier l'ampleur et/ou le sens des émissions de GES, notamment pour le compartiment sol. Il est ainsi démontré que la mise en place de systèmes de suivi (Mesure, Rapport, Vérification) fiables pour le carbone organique du sol nécessite de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des stocks de COS et de leurs déterminants.

Mots clés : Fouille de données, spatialisation, cartographie numérique, spectroscopie proche et moyen infrarouge, calculateur EX-ACT, Andosol, Ferralsol, Cambisol, allophanes, canne à sucre.

Land uses, land use changes and agricultural soils: impacts on soil organic carbon stocks for tropical volcanic areas.

Spatial approach and greenhouse gases balance at Réunion Island.

ABSTRACT

Soil is a key compartment in the global carbon cycle, both by its pool, two or three times higher than the atmosphere, and by its fluxes between land and atmosphere. As part of the implementation of climate change mitigation policies, it is essential to have a better understanding of soil organic carbon (SOC) stocks and land use change impacts. Since the evaluation of SOC stock at the territorial scale is a methodological issue, a simple and low-cost methodology for measuring SOC content, bulk density and SOC stock by near- and mid-infrared spectroscopy in the field and in the laboratory has been developed. In order to map and quantify SOC stocks of agricultural soils in 'La Réunion' island, a stratification methodology to divide the territory into pedoclimatic units has been developed. Mid infrared spectroscopy, coupled with an unsupervised classification, has shown its relevance for defining pedological units along the weathering gradient from Andosol to Ferralsol and Cambisol. Based on stratification results, SOC stocks calculation has shown very high SOC stocks in agricultural soils of 'La Réunion' (under sugarcane, main crop on the island, mean SOC stock is 131 MgC ha^{-1}) but vulnerable to land use change, especially when land use shifting occurred from sugarcane to market gardening or pineapple crop (SOC stock can drop by 14 to 41 %). In order to evaluate the greenhouse gas (GHG) balances under different land use change scenarios, changes of SOC stocks according to land use changes, by pedoclimatic unit, were reported as Tier 2 emission factors in EX-ACT tool. The results of GHG balances showed that a spatial approach was essential to evaluate the impacts of land use change on SOC stocks in order to not modify the magnitude and / or the direction of GHG emissions, especially for the soil compartment. To put in place reliable monitoring systems (Monitoring, Reporting, Verification) for soil organic carbon, the spatial variability of SOC stocks and their drivers need to be taken into account.

Keywords: Data mining, spatialization, digital mapping, near- and mid-infrared spectroscopy, EX-ACT tool, Andosol, Ferralsol, Cambisol, allophanes, sugarcane.

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'Ile de La Réunion.

Résumé

Le sol est un compartiment clé dans le cycle global du carbone, à la fois par son réservoir, 2 à 3 fois supérieur à celui de l'atmosphère, et par ses flux entre terres émergées et atmosphère. Dans le cadre de la mise en place de politiques d'atténuation du changement climatique, il est nécessaire de mieux connaitre les stocks de carbone organique du sol (COS) et leurs variations lors de changements d'usages. L'évaluation du stock du carbone organique du sol à l'échelle territoriale étant un enjeu méthodologique, il est proposé une méthodologie simple et à bas coût de mesure de la teneur en COS, de la densité apparente et du stock de COS par spectroscopie proche et moyen infrarouge in situ et au laboratoire. Afin de cartographier et quantifier les stocks de carbone organique des sols agricoles de La Réunion, une méthodologie de stratification du territoire en unités pédoclimatiques a été développée. La spectroscopie moyen infrarouge, couplée à une classification non supervisée, a montré son efficacité pour définir des unités pédologiques homogènes (discriminantes) selon un gradient d'altération caractéristique de la pédogenèse en zone volcanique tropicale de La Réunion. En s'appuyant sur les résultats de la stratification du territoire, le calcul des stocks de COS a montré des stocks de carbone organique très élevés pour les sols agricoles de La Réunion (sous canne à sucre, culture majoritaire de l'île, le stock moyen de COS est de 131 MgC ha^{-1}) mais vulnérables aux changements d'usages, notamment lors de changement d'usage de la canne à sucre vers une culture maraichère ou une culture d'ananas (déstockage de COS allant de -14 à -41 % du stock initial de COS). Afin d'évaluer les bilans de gaz à effet de serre (GES) de différents scénarios de changement d'usage des terres agricoles, les variations de stocks de carbone organique du sol selon les changements d'usages agricoles ont été calculées par unité pédoclimatique puis utilisés comme facteur d'émissions Tier 2 dans le calculateur EX-ACT. Les résultats des bilans de GES ont montré qu'une approche spatiale était indispensable pour évaluer les variations de stocks de carbone organique du sol selon les changements d'usages agricoles afin de ne pas modifier l'ampleur et/ou le sens des émissions de GES, notamment pour le compartiment sol. Il est ainsi démontré que la mise en place de systèmes de suivi (Mesure, Rapport, Vérification) fiables pour le carbone organique du sol nécessite de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des stocks de COS et de leurs déterminants.

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER