

RAPPORT FINAL

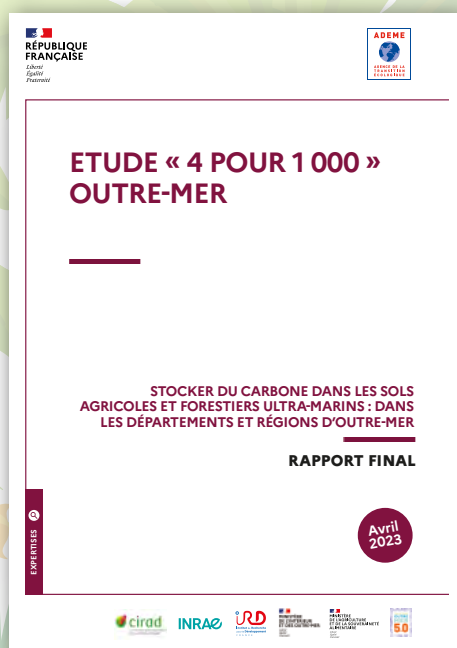
avril 2023



STOCKER DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICOLAS ET FORESTIERS ULTRAMARINS



*Etat des connaissances et leviers d'actions
dans les départements et régions d'Outre-mer*



CE DOCUMENT
EXISTE
SOUS UNE AUTRE
MISE EN FORME
MAIS LE CONTENU
EST IDENTIQUE

Remerciements

Les auteurs du rapport expriment leurs remerciements envers les membres des différents comités de suivi de l'étude.

Les membres du comité de pilotage :

Délégation inter-ministérielle à la transformation agricole des Outre-mer (Arnaud Martrenchar, Jean Bernicot), Ministère en charge de l'agriculture (Isabelle Ouillon, Nezha Chachia, Christelle Sureau), Secrétariat Exécutif de l'Initiative 4 pour 1000 (Paul Luu), ODEADOM (Jacques Andrieu), Agence Française de Développement (Mathieu Morando), ADEME (Pierre Courtiade, Alizée Destombes, Léa Jenin, Thomas Eglin, Charlotte Gully, Antoine Piérart, Sylvain Rullier).

Les membres du comité scientifique et technique :

Sylvain Pellerin (INRAE), Laure Bamière (INRAE), Claire Chenu (INRAE), Stéphane Guitet (ONF), Marc Corbeels (Cirad/CIMMYT), Tantely Razafimbelo (LRI, Université d'Antananarivo, Madagascar), Denis Angers (Agriculture and Agri-food, Canada), Yves Montouroy (Université des Antilles), Sébastien Treyer (IDDRI), Luiz Fernando Carvalho Leite (EMBRAPA, Brésil).

Les membres du comité technique inter-territoires :

ADEME (Thomas Eglin, Antoine Piérart), ODEADOM (Jacques Andrieu), ACTA (Mathilde Heurtaux, Laure Soucémariadin), IDELE (Hélène Chambaut), Arvalis (Baptiste Soenen), Terres Inovia (Anne-Sophie Perrin), ONF (Nathalie Barbe, Olivier Van den Bossche), QualiTropic (Vladislav Kyulavski), SOLAGRO (Jean-Luc Bochu), Assemblée permanente des Chambres d'Agriculture (Johnny Apaya, Yousri Hannachi), Association française d'agroforesterie.

Les membres des comités locaux :

- Guadeloupe : ADEME Guadeloupe, DAAF, DEAL, Région Guadeloupe, Conseil Départemental, Chambre d'Agriculture de Guadeloupe, Assofwi, IT2, SAPCAV, ONF, Centre technique de la canne à sucre
- Guyane : ADEME Guyane, Direction Générale des Territoires et de la Mer de Guyane, Collectivité Territoriale de Guyane, Chambre d'Agriculture de Guyane, ONF, Solicaz
- Martinique : ADEME Martinique, DAAF, DEAL, Collectivité Territoriale de Martinique, Chambre d'Agriculture de Martinique, IT2, ONF, Parc Naturel de Martinique, ValCaCo
- Mayotte : ADEME Réunion - Mayotte, DAAF, DEAL, Conseil Départemental, Chambre d'Agriculture de Mayotte, Lycée agricole de Coconi, ONF, Saveurs et senteurs de Mayotte, Café cacao mahoré, UCOOPAM, BRGM, Etablissement public foncier et d'aménagement de Mayotte
- La Réunion : ADEME Réunion - Mayotte, DAAF, DEAL, Région Réunion, Conseil Départemental, Chambre d'Agriculture de La Réunion, ONF, Association réunionnaise de pastoralisme, Ercane, Fédération réunionnaise des coopératives agricoles, RITA Canne, RITA Horticulture, RITA Elevage

Rédacteurs du rapport :

Julien Demenois (Cirad), Jean-Marc Blazy (INRAE), Alain Albrecht (IRD), Vincent Blanfort (Cirad), Vincent Freycon

(Cirad), Antoine Versini (Cirad), Jorge Sierra (INRAE), Jean-Christophe Roggy (INRAE)

Contributeurs à l'étude :

Kenji Fujisaki (IRD) : post-doctorant, partie biophysique
Adrien Testé (Cirad) : volontaire de service civique, partie biophysique Guyane
Armel Thongo M'bou (Cirad) : volontaire de service civique, transposabilité du Label Bas Carbone aux territoires ultramarins (modélisation)
Alma Gavazzi (Cirad) : stagiaire M2, analyse de la fabrication et de la mise en œuvre des politiques publiques de stockage de carbone dans les sols agricoles et forestiers ultramarins
Clara Ponton (INRAE) : stagiaire M2, déterminants socio-économiques de la séquestration du carbone dans les sols ultramarins
Margot Moniot (consultante) : partie biophysique Guyane (carbone aérien et carbone du sol)
Ivonne Acosta-Alba (consultante) : transposabilité du Label Bas Carbone aux territoires ultramarins
Yves Montouroy (Université des Antilles) : encadrement
Alma Gavazzi

Contributeurs membres du consortium Cirad-INRAE-IRD :

Angel Avadi (Cirad), Anthony Benoist (Cirad), Laëtitia Bréchet (CNRS), Tiphaine Chevallier (IRD), Jean-Luc Chotte (IRD), Géraldine Derroire (Cirad), Marc Dorel (Cirad), Frédéric Feder (Cirad), Paula Fernandes (Cirad), Harry Ozier-Lafontaine (INRAE), Antoine Richard (INRAE), Clément Stahl (INRAE), Pierre Todoroff (Cirad), Jonathan Vayssières (Cirad)

Relecteurs du rapport :

Anne Heurtaux (consultante), Ellie Daguet (Cirad)

Maquettage : Laure Jacob pour Atelier Aymara (www.une-saison-en-guyane.com)

Citation de ce rapport :

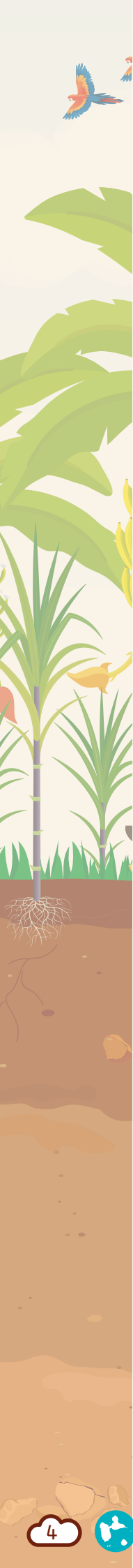
DEMENOIS Julien, ALBRECHT Alain, BLANFORT Vincent, BLAZY Jean-Marc, FREYCON Vincent, ROGGY Jean-Christophe, SIERRA Jorge, VERSINI Antoine, FUJISAKI Kenji, TESTE Adrien, THONGO MBOU Armel, GAVAZZI Alma, PONTON Clara, MONIOT Margot, ACOSTA-ALBA Ivonne, MONTOUROY Yves, AVADI Angel, BENOIST Anthony, BRECHET Laëtitia, CHEVALLIER Tiphaine, CHOTTE Jean-Luc, DERROIRE Géraldine, DOREL Marc, FEDER Frédéric, FERNANDES Paula, RICHARD Antoine, STAHL Clément, TODOROFF Pierre, VAYSSIERES Jonathan, HEURTAUX Anne, DAGUET Ellie. 2023. Rapport final – Etude « 4 pour 1 000 » Outre-mer – Stocker du carbone dans les sols agricoles et forestiers ultramarins – Etat des connaissances et leviers d'actions dans les départements et régions d'Outre-mer. Cirad, INRAE, IRD, 154 p.

<https://agritrop.cirad.fr/604399/>

Cet ouvrage est disponible en ligne :

<https://librairie.ademe.fr/>

Étude réalisée par le consortium Cirad-INRAE-IRD, cofinancée par l'ADEME (Numéro de contrat : 20-03-C0034)



Sommaire

Contexte du projet, enjeux et objectifs..... 8

Contexte et objectifs de l'étude 10

Définitions des termes et des concepts 12

Présentation des territoires d'étude 14

Méthodologie 16

Gouvernance du projet 17

Volet biophysique de l'étude 18

Guadeloupe 18

Martinique 19

La Réunion 19

Guyane 20

Transposabilité des méthodologies agricoles du Label

« bas-carbone » 20

Volet socio-économique et politique de l'étude 21

Analyse des déterminants socio-économiques

des pratiques et usages ayant une influence sur les

stocks de carbone 21

Analyse de la fabrication et la mise en œuvre

des politiques publiques de stockage de carbone

dans les sols agricoles et forestiers ultramarins 23

Principaux résultats de l'étude 25

Quels sont les stocks de carbone du sol à l'échelle
des territoires ultramarins ? 25

Quels sont les déterminants des stocks de carbone
du sol à l'échelle des territoires ultramarins ? 25

Quels sont les stocks de carbone du sol selon
les types de sols ? 26

Quels sont les stocks de carbone du sol selon
les usages des sols ? 27

Quel est l'effet des changements d'usages des sols
sur les stocks de carbone du sol des territoires
ultramarins ? 28

**FOCUS La forêt guyanaise et les enjeux
des changements d'usage sur le stockage
du carbone aérien et du sol 30**

Quel est l'effet des changements de pratiques sur les
stocks de carbone du sol des territoires ultramarins ? .. 31

**FOCUS Transposabilité de méthodes du
Label « bas-carbone » aux territoires ultramarins :
exemple de La Réunion 32**

Situation, déterminants socio-économiques et politiques
des usages et pratiques stockantes de carbone des sols
agricoles et forestiers des territoires ultramarins 35

Usages des sols agricoles et forestiers :
état des lieux et dynamiques 35

Niveau de mise en œuvre de pratiques agricoles ayant
une influence sur les stocks de carbone des sols 38

Déterminants socio-économiques des pratiques agricoles
et leviers à actionner pour augmenter leur adoption 39

FOCUS Les paiements pour services écosystémiques ... 41

Mise à l'agenda politique européen et national du
stockage du carbone 42

Conclusions, recommandations d'actions et
perspectives du volet socio-économique et politique ... 43

**FOCUS De la fabrique des politiques à leur mise en œuvre
sur les territoires : cas de la Guadeloupe 44**

Principales recommandations et
perspectives de l'étude 47

Constats 47

Recommandations 47

Besoins de connaissances et actions de recherche 48

La Guadeloupe 50

Présentation du territoire 51

Contexte biophysique 51

Contexte agricole 52

Une production alimentaire confrontée à
de multiples défis 54

**Stocks de carbone dans les sols et principaux
déterminants 54**

Stocks de carbone du sol selon le type de sol 54

Stocks de carbone du sol selon l'altitude 55

Stocks de carbone du sol selon les propriétés

chimiques des sols 55

Stocks de carbone du sol selon l'usage des sols 56

Effet des pratiques sur les stocks de carbone du sol 57

FOCUS Quelques cultures particulières 58

Stocks de carbone du sol sous l'effet du changement
climatique 60

Spatialisation des stocks de carbone du sol 61

Faisabilité de l'application de l'objectif « 4 pour 1000 »
en Guadeloupe 61

**Déterminants socio-économiques des stocks de carbone
des sols 62**

Usages des sols agricoles : état des lieux 62

Pratiques agricoles (dé)stockantes : niveau de mise en
œuvre 62

Déterminants socio-économiques de l'adoption de
pratiques agricoles (dé)stockantes 64

ZOOM Guadeloupe 66

La Martinique 68

Présentation du territoire 69

Contexte biophysique 69

Contexte agricole 70

Un contexte socio-économique et démographique en
mutation 72

**Stocks de carbone dans les sols et principaux
déterminants 73**

Stocks de carbone du sol selon le type de sol 73

Stocks de carbone du sol selon la teneur en argile 74

Stocks de carbone du sol selon l'usage du sol 75

Effets du changement d'usage des sols sur les

stocks de carbone du sol 76

Effet des pratiques sur les stocks de carbone des sols ... 78

Spatialisation des stocks de carbone du sol 79

Déterminants socio-économiques des stocks de carbone du sol	80
Usages des sols agricoles : état des lieux.....	80
Pratiques agricoles (dé)stockantes : niveau de mise en œuvre	80
Déterminants socio-économiques de l'adoption.....	80
ZOOM Martinique	84
Enjeux et pistes de réflexion pour la Guadeloupe et la Martinique.....	86

La Réunion88

Présentation du territoire.....	89
Contexte biophysique.....	89
Contexte agricole et forestier.....	92
Stocks de carbone dans les sols et principaux déterminants.....	94
Principales sources de données mobilisées.....	94
Estimation de la densité apparente des sols par spectrométrie infra-rouge	94
Analyse globale des déterminants des teneurs en carbone du sol.....	94
Stocks de carbone du sol selon le type de sol.....	95
Stocks de carbone du sol selon l'usage du sol	96
Spatialisation des stocks de carbone du sol	97
Effets des changements d'usage des sols sur le carbone du sol	99
Effet des pratiques sur les stocks de carbone du sol.....	101
Déterminants socio-économiques des stocks de carbone du sol	104
Usages des sols agricoles et forestiers : état des lieux.....	104
Pratiques agricoles (dé)stockantes : niveau de mise en œuvre.....	105
Déterminants socio-économiques de l'adoption.....	106
Enjeux et pistes de réflexion pour La Réunion	107
ZOOM La Réunion	108

La Guyane110

Présentation du territoire.....	111
Contexte biophysique.....	111
Contexte agricole et forestier.....	112
Contexte institutionnel.....	113
Stocks de carbone dans les sols et principaux déterminants.....	114
Source des données et méthodologie.....	114
Stock de carbone du sol selon le type de sol.....	115
Spatialisation des stocks de carbone du sol	116
Stock global de carbone du sol et incertitudes.....	116
Variabilité temporelle des stocks de carbone du sol.....	117
Autres déterminants des stocks de carbone du sol.....	117
Effets des changements d'usage des sols sur les stocks de carbone du sol	118
Effets des pratiques forestières et agricoles sur les stocks de carbone du sol	120

Stocks de carbone dans la biomasse aérienne et principaux déterminants	124
Comment évaluer les stocks de carbone aérien à l'échelle du territoire ?	124
Evaluation des stocks de carbone aérien sur l'ensemble du territoire.....	126
Variabilité spatiale du carbone aérien forestier	128
Impact des changements climatiques sur le carbone aérien	129
Effets des variations inter-annuelles du climat sur la dynamique forestière.....	129
Effet de la variabilité spatiale	130
Déterminants socio-économiques des stocks de carbone du sol et aérien.....	131
Usages des sols agricoles et forestiers : état des lieux	131
Pratiques agricoles (dé)stockantes : niveau de mise en œuvre.....	132
Déterminants socio-économiques de l'adoption.....	133
Enjeux et pistes de réflexion pour la Guyane	134
ZOOM Guyane	108

Références bibliographiques140

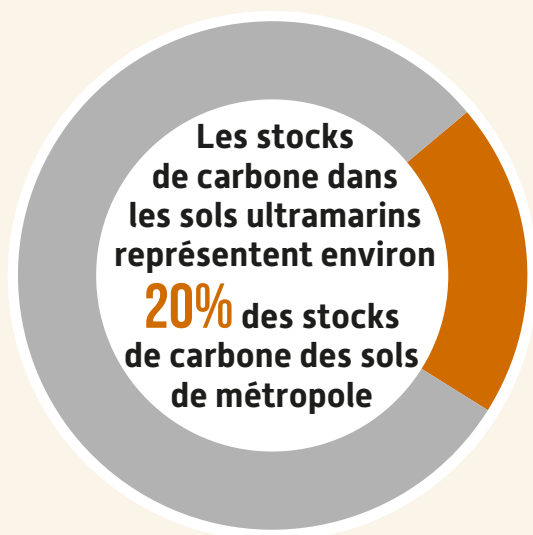
Partie contexte, méthodologie, résultats et recommandations	140
Partie Guadeloupe	141
Partie Martinique	142
Partie La Réunion.....	143
Partie Guyane.....	144
Index des figures, des tableaux et des équations.....	148
Sigles et acronymes.....	151
Lexique.....	153

Résumé

Coordonnée par le Cirad en partenariat avec INRAE et l'IRD, l'étude « 4 pour 1000 » Outre-mer dresse un bilan inédit des stocks de carbone du sol des territoires ultramarins. Les auteurs formulent des recommandations opérationnelles et de recherche pour préserver ces stocks élevés et répondre aux grands enjeux actuels de l'agriculture face au changement climatique au niveau national et territorial. Si le potentiel des sols métropolitains a fait l'objet d'une évaluation en 2019, celui des territoires ultramarins était jusqu'ici méconnu. Dans le cadre de la présente étude, les auteurs dressent pour la première fois un état des lieux des connaissances pour la Guadeloupe, la Martinique, la Guyane, La Réunion, Mayotte, Saint-Martin et Saint-Barthélemy.

Deux constats majeurs sont dressés.

En matière de stocks de carbone dans les sols, les territoires ultramarins jouent un rôle important malgré leur faible superficie (15 % de celle de l'hexagone) : ils équivalent à environ 20 % des stocks de carbone du sol de métropole. Cela s'explique essentiellement par la minéralogie originale de ces sols développés sur roches volcaniques, mais également l'impact de leurs usages (forêt, prairie, canne à sucre ...).



Autre constat : les données existantes sur le carbone du sol dans ces territoires sont incomplètes. Les sols de la Guadeloupe, de la Martinique, de Guyane et de La Réunion sont documentés de façon conséquente mais parcellaire. En revanche, aucune information n'existe encore pour Mayotte, Saint-Barthélemy et Saint-Martin. En outre, du fait de l'importance de la forêt guyanaise (équivalant à 46 % de la superficie forestière métropolitaine), le carbone stocké dans la biomasse aérienne a spécifiquement été étudié dans le cadre de cette étude. Il en ressort qu'il équivalait à 120 % du carbone aérien des forêts métropolitaines.

Les auteurs formulent une série de recommandations.

PREMIÈREMENT, il faut préserver les stocks élevés de carbone du sol et de la biomasse aérienne dans les territoires ultramarins et en limiter leur diminution :

- **Intégrer** dans la Politique Agricole Commune la rémunération des services écosystémiques associés aux pratiques agricoles et forestières préservant les stocks des sols ;
- **Lutter** contre la spéculation et la rétention de foncier agricole ;
- **Promouvoir** les pratiques agroécologiques grâce à des mesures incitatives et à la communication ;
- **Faciliter** l'accès aux moyens nécessaires à la mise en œuvre des bonnes pratiques : investissement, Coopérative d'utilisation de matériel agricole et formations ;
- **Transposer** le Label « bas-carbone » pour contribuer à l'adoption de pratiques stockant du carbone par une incitation économique.

DEUXIÈMEMENT, des actions de recherche doivent être menées pour mettre en œuvre efficacement les recommandations précédentes :

- **Accroître** les connaissances des stocks de carbone du sol dans ces territoires pour mesurer les retombées des politiques publiques ;
- **Adapter** les méthodes de quantification des capacités de stockage du carbone dans les sols pour transposer le Label « bas-carbone » ;
- **Accentuer** les travaux sur la dimension sociale pour favoriser les innovations et l'adoption de bonnes pratiques ;
- **Développer** des approches co-construites d'évaluation de scénarios agroécologiques à l'échelle de chaque territoire ultramarin ;
- **Créer** davantage de lien entre science et politique et mieux intégrer les territoires d'Outre-mer dans les engagements français et européen en matière de lutte contre le changement climatique.

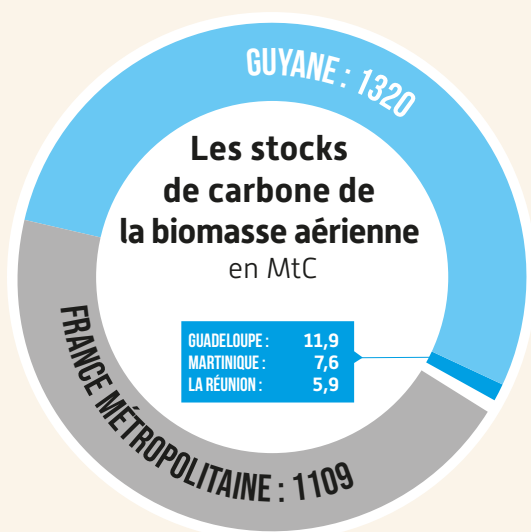
Abstract

Coordinated by Cirad in partnership with INRAE and IRD, the “4 for 1000” study in overseas France provides an unprecedented assessment of soil carbon stocks in overseas territories. The authors formulate operational and research recommendations to preserve these high stocks and respond to the major challenges facing agriculture in the face of climate change at the national and territorial levels. While the potential of metropolitan soils was assessed in 2019, the potential of the overseas territories was previously unknown. In this study, the authors present, for the first time, an overview of the state of knowledge for Guadeloupe, Martinique, French Guiana, Reunion, Mayotte, Saint-Martin and Saint-Barthélemy.

Two major findings were made.

In terms of soil carbon stocks, the overseas territories play an important role despite their small surface area (15% of that of France): they are equivalent to approximately 20% of the soil carbon stocks in mainland France. This is mainly due to the original mineralogy of these soils developed on volcanic rocks, but also to the impact of their uses (forest, grassland, sugar cane, etc.).

Another observation: existing data on soil carbon in these territories are incomplete. The soils of Guadeloupe, Martinique, French Guiana and Reunion are documented in a consistent but fragmented manner. On the other hand, no information exists yet for Mayotte, Saint-Barthélemy and Saint-Martin. In addition, due to the size of the Guianese forest (equivalent to 46% of the forest area in mainland France), the carbon stored in the above-ground biomass was specifically studied in the context of this study. It was found that it is equivalent to 120% of the aerial carbon of metropolitan forests.



The authors make a series of recommendations.

FIRSTLY, the high soil and above-ground biomass carbon stocks in the overseas territories must be preserved and their decline limited:

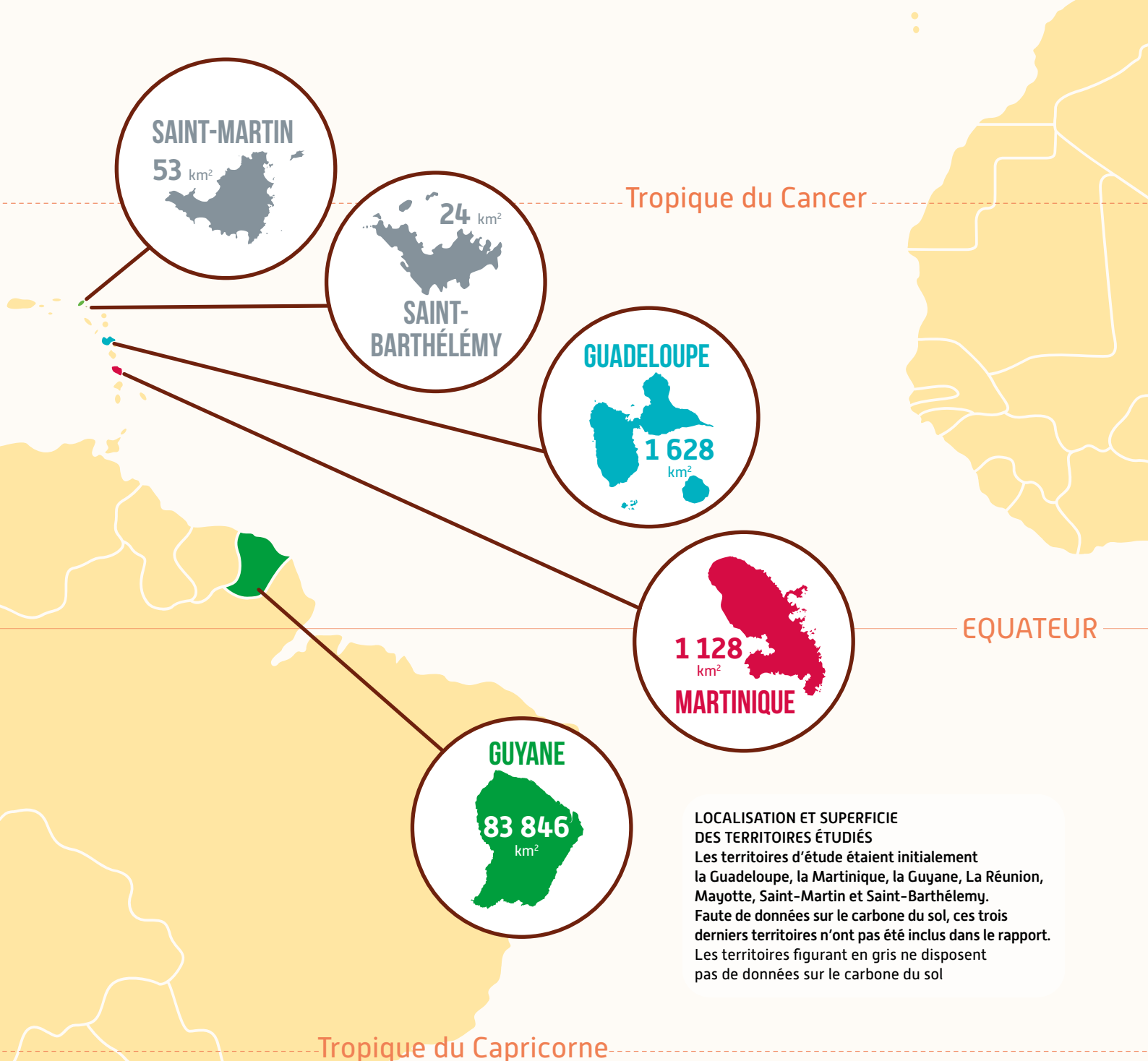
- **Integrate** into the Common Agricultural Policy the payment of ecosystem services associated with agricultural and forestry practices that preserve soil stocks;
- **Fight** against speculation and the retention of agricultural land;
- **Promote** agroecological practices through incentives and communication;
- **Facilitate** access to the means necessary for the implementation of good practices: investment, cooperative use of agricultural equipment and training;
- **Transpose** the “low-carbon” Label to contribute to the adoption of carbon-storing practices through an economic incentive.

SECONDLY, research actions must be carried out to effectively implement the above recommendations:

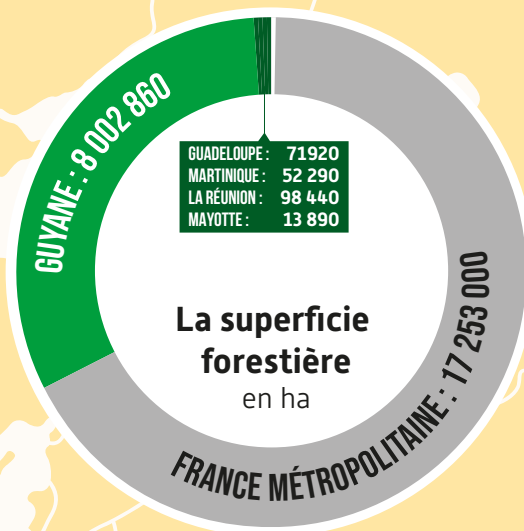
- **Increase** knowledge of soil carbon stocks in these territories to measure the impact of public policies;
- **Adapt** the methods for quantifying carbon storage capacities in soils to transpose the “low carbon” Label;
- **Accentuate** work on the social dimension to encourage innovation and the adoption of good practices;
- **Develop** co-constructed approaches for evaluating agroecological scenarios on the scale of each overseas territory;
- **Create** more links between science and policy and better integrate the overseas territories into French and European commitments to combat climate change.

Contexte du projet, enjeux et objectifs

Les sols sont au cœur des enjeux globaux et le carbone organique y tient une place majeure. Ils contribuent à la lutte contre le réchauffement climatique en absorbant le CO₂ de l'atmosphère. Ils sont un réservoir de biodiversité. Ils jouent également un rôle important dans la sécurité alimentaire puisque 95 % de notre alimentation dépendent directement des sols. Stocker du carbone organique dans les sols participe à leur fertilité, à la limitation de leur érosion et à leur capacité à retenir l'eau.



FRANCE
MÉTROPOLITAINE
551 695 km²



Le maintien ou l'augmentation des stocks de carbone organique du sol constitue l'une des rares options identifiées par le **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)** permettant de contribuer à ces défis globaux. Le lancement récent, par l'Union européenne, de la mission « *Santé des sols et alimentation* », ne fait que confirmer cet intérêt croissant pour les sols et le carbone organique des sols. Leur gestion durable

doit permettre de contribuer à plusieurs des **Objectifs de Développement Durable des Nations Unies** dont l'ODD 2 sur la faim zéro, l'ODD 13 sur les mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques, et l'ODD 15 sur la conservation et la restauration des terres, ou encore à la Stratégie Nationale Bas Carbone de la France. Dans les territoires ultramarins, les sols sont également au cœur d'enjeux locaux : résilience au changement climatique, autonomie alimentaire, alimentation

durable, emploi, gestion des déchets. Ces enjeux structurent les objectifs à l'horizon 2030 de la **Trajectoire Outre-mer 5.0 : Zéro exclusion, Zéro carbone, Zéro déchet, Zéro polluant agricole, Zéro vulnérabilité.**

Les sols agricoles et forestiers ultramarins peuvent tenir une place importante pour atteindre ces objectifs. C'est l'ambition de l'Initiative internationale « **4 pour 1000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat** » (<https://4p1000.org>).



Contexte et objectifs de l'étude

Le 24 février 2020, le Ministère des Outre-mer, le Cirad, INRAE et l'IRD, en présence de l'Initiative internationale « 4 pour 1 000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat », ont signé un accord-cadre relatif à une coopération scientifique et technique sur l'Initiative « 4 pour 1 000 » ayant pour but de faciliter son déploiement dans les territoires ultramarins, en cohérence avec la Trajectoire Outre-mer 5.0.

La vocation à se décliner notamment à travers la réalisation d'études facilitant la diffusion de l'information scientifique et technique auprès des acteurs de la Trajectoire Outre-mer 5.0. La présente étude s'inscrit dans ce contexte de déclinaison opérationnelle de l'accord-cadre.

L'Initiative invite tous les acteurs impliqués à mettre en place des actions concrètes favorisant le stockage du carbone dans les sols par la promotion d'une palette de pratiques. Son ambition est d'inciter les acteurs à s'engager dans une transition vers une agriculture et une sylviculture productives, hautement résilientes, fondées sur une gestion adaptée des terres et des sols, créatrices d'emplois

et de revenus et ainsi porteuses de développement durable.

La Trajectoire Outre-mer 5.0 est quant à elle structurée autour de cinq objectifs à l'horizon 2030 : Zéro exclusion, Zéro carbone, Zéro déchet, Zéro polluant agricole, Zéro vulnérabilité.

En 2019, l'étude intitulée « Stocker du carbone dans les sols français – Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1 000 et à quel coût ? » (Etude 4 pour 1 000 France) a été conduite par l'INRA sur le territoire métropolitain. Elle a permis d'identifier des pratiques agricoles et sylvicoles permettant un stockage additionnel de carbone dans les sols, de chiffrer et de cartographier ce potentiel de stockage

additionnel, d'évaluer son coût de mise en œuvre, d'identifier les freins à l'adoption de ces nouvelles pratiques et de proposer une stratégie coût-efficacité de stockage. Cette étude fait aujourd'hui référence au niveau international et sa réplique est en cours dans d'autres pays européens.

L'objectif de la présente étude était de dresser un état des lieux des connaissances sur les stocks et les flux de carbone dans les sols des départements et régions d'Outre-mer (DROM), territoires qui représentent plus de 15 % de la superficie de l'hexagone.

Elle a ainsi permis l'identification de leviers à mobiliser pour favoriser la

La ferme agroécologique expérimentale
Karusmart en Guadeloupe
(crédit photo : J-M. Blazy)



conservation des stocks et améliorer le stockage de carbone dans les sols sur ces territoires. Néanmoins, la quasi absence de données et de connaissances sur le carbone du sol à Mayotte, Saint-Martin et Saint-Barthélemy a conduit à ne pas les inclure dans le rapport.

Ce premier travail a répondu aux questions suivantes :

- Quels sont les stocks de carbone dans les sols et comment évoluent-ils à l'échelle du territoire ?
- Quels sont les effets des changements d'usages des terres sur ces stocks de carbone du sol ?
- Quels sont les effets des pratiques agricoles et forestières sur les stocks de carbone du sol ?
- Quels sont les déterminants socio-économiques et politiques des usages et des pratiques favorisant le stockage de carbone dans les sols ?
- Quels sont les leviers à mobiliser pour favoriser le stockage de carbone dans les sols ?
- Comment transposer les méthodologies agricoles du Label « bas-carbone » dans les territoires ultramarins ?

L'étude avait également pour objectif d'identifier les déficits de connaissances à combler pour élaborer des politiques publiques préservant les stocks de carbone dans les sols ultramarins.

Finalement, nos recommandations ont pour ambition de participer à la mise en œuvre, par les acteurs agricoles et forestiers des territoires ultramarins, de pratiques contribuant à l'atténuation du changement climatique et à l'adaptation à ses effets, aux objectifs de la Trajectoire Outre-mer 5.0. à travers le stockage de carbone dans les sols.

A ce titre, elle constitue le premier volet d'un travail plus global visant à :

1. Partager entre territoires ultramarins les connaissances scientifiques sur la séquestration du carbone dans les sols ;
2. Co-construire avec les acteurs agricoles et forestiers des territoires ultramarins des scénarios d'évolution d'usage des sols et des pratiques agricoles et forestières, et les évaluer au regard des objectifs de la Trajectoire 5.0 ;
3. Favoriser, entre territoires ultramarins, les échanges de pratiques agricoles et forestières favorisant la séquestration de carbone dans les sols.



Associations culturales dans une bananeraie en Guadeloupe (crédit photo : J-M. Blazy)



Plantation de canne à sucre en Guadeloupe (crédit photo : J-M. Blazy)



Pâturage en Guyane (crédit photo : V. Blanfort)

Définitions des termes et des concepts

Il convient tout d'abord de rappeler ce qu'est le « 4 pour 1000 ». L'Initiative internationale « 4 pour 1000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat » a été lancée en 2015 lors de la COP 21 sur le climat. Elle vise à montrer que les sols agricoles et forestiers peuvent jouer un rôle crucial pour la sécurité alimentaire et le changement climatique.

L'Initiative promeut ainsi la protection et l'accroissement des stocks de carbone du sol au niveau mondial. A l'échelle mondiale, les sols contiennent en effet 2 à 3 fois plus de carbone que l'atmosphère. Si le niveau de carbone stocké par les sols dans les 30 à 40 premiers centimètres de ceux-ci augmentait de 4‰ par an, l'augmentation annuelle de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère serait considérablement réduite. Ce taux de 4‰ par an est une orientation à suivre proposée par l'Initiative « 4 pour 1000 » mais ne constitue pas un objectif quantitatif strict.

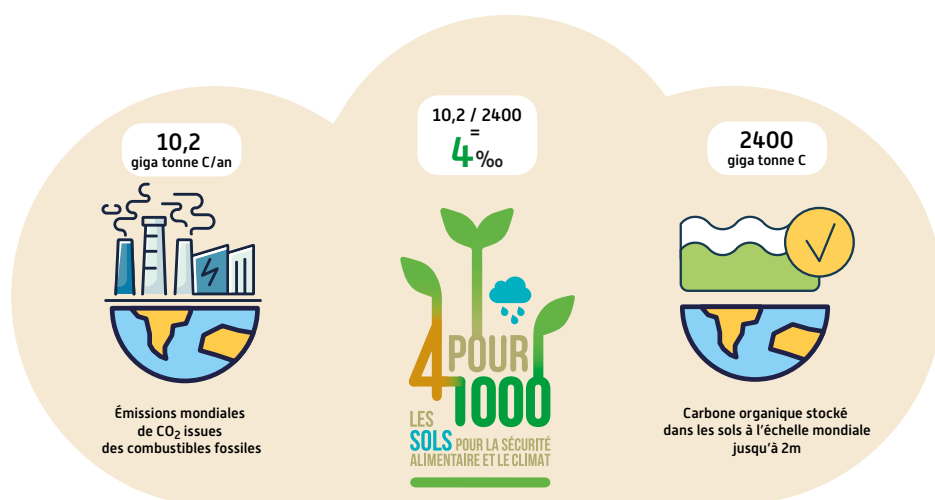


Figure 1 – Le « 4 pour 1000 » en schéma - Protéger et accroître les stocks de carbone organique du sol au niveau mondial pour atténuer et s'adapter au changement climatique, et contribuer à la sécurité alimentaire (adapté de Minasny et al. (2017) et actualisé avec Friedlingstein et al. (2022))

Définition

Dans le sol, le carbone y est présent sous deux formes : « **organique** » et « **minérale** ». Un atome de carbone est défini comme « organique » lorsqu'il est au moins lié à un atome d'hydrogène. Dans le cas contraire, on parle de carbone « minéral ».

Le carbone minéral du sol est essentiellement représenté par les composés carbonatés, issus de la dégradation d'une roche mère contenant du calcaire. Le carbone organique du sol est quant à lui le constituant principal des matières

organiques présentes dans les sols. Ces matières organiques proviennent directement ou indirectement de la production photosynthétique des végétaux supérieurs et sont constituées d'environ **50 % de carbone**. Les matières organiques du sol sont constituées à 95 % de matières organiques mortes et à 5 % d'organismes

vivants. Ces proportions sont indicatives et peuvent varier fortement d'un sol à l'autre. La teneur en carbone organique du sol (COS) étant plus susceptible de varier à une échelle de temps humaine et via les activités anthropiques, les efforts de protection et d'accroissement des stocks de carbone du sol se concentrent sur celui-ci.

Les lignes directrices du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) définissent ainsi le stock de carbone du sol comme « **le carbone organique des sols minéraux et organiques** (y compris la tourbe) à une **profondeur spécifiée choisie par le pays et utilisée avec cohérence dans la série temporelle**. Les racines vivantes minces (inférieures au diamètre adopté pour la biomasse souterraine) **sont incluses dans les matières organiques du sol lorsqu'il n'est pas possible de les distinguer empiriquement** » (IPCC (2006)). Usuellement, les stocks de carbone organique du sol sont mesurés sur les 30 ou 40 premiers centimètres du sol et ciblent les matières organiques d'une taille inférieure à 2 mm. Le stock de carbone du sol représente la quantité totale de carbone organique

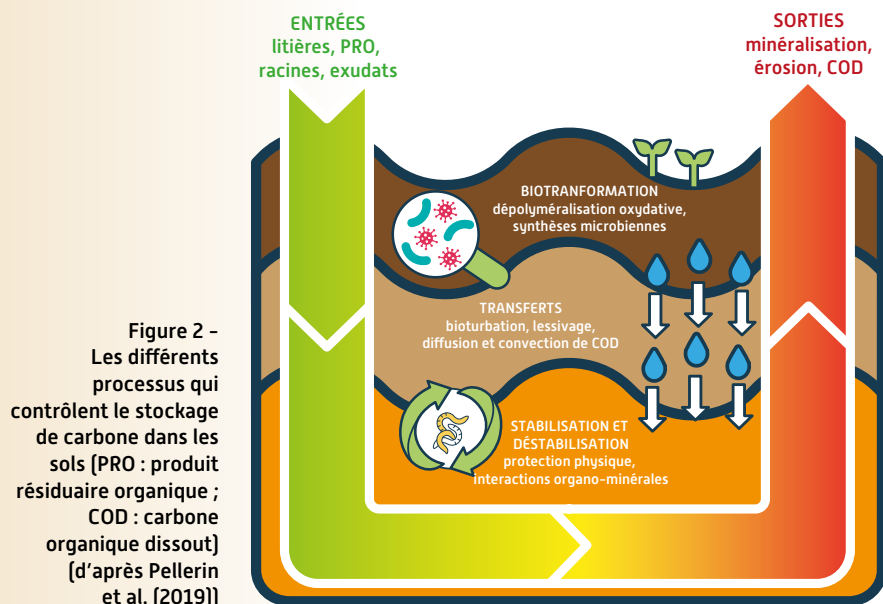


Figure 2 – Les différents processus qui contrôlent le stockage de carbone dans les sols (PRO : produit résiduaire organique ; COD : carbone organique dissout) (d'après Pellerin et al. (2019))

contenue dans un volume de sol donné. Il est exprimé le plus souvent en tonnes de carbone par hectare (tC/ha) et est calculé selon l'équation suivante :



Équation 1 Principe général du calcul du stock du carbone du sol

Stock = Teneur en carbone organique
x densité apparente du sol
x épaisseur du prélèvement
x [1 – taux d'éléments grossiers]

- **Teneur en carbone organique (gC/kg)** : proportion massique de l'élément carbone sous forme de matière organique dans le sol sec
- **Densité apparente du sol (kg/m³)** : volume de sol frais occupé par une masse de sol sec
- **Épaisseur du prélèvement (m)** : épaisseur de la couche de sol pour laquelle le stock de carbone est calculé
- **Taux d'éléments grossiers** : pourcentage massique d'éléments grossiers (> 2 mm)

A l'échelle planétaire, on distingue plusieurs réservoirs de carbone (ex : végétation, sol, océan, atmosphère), chacun contenant des stocks de carbone. Des échanges de carbone se font en permanence entre ces réservoirs et constituent les flux de carbone.

Définition

Un flux est une masse de carbone échangée entre deux réservoirs pendant une durée définie exprimée par exemple en tonnes de carbone par an (tC/an).

Le stock de carbone d'un sol est la somme de ce qui reste de chacun des apports. Il dépend donc des flux de carbone entrants, des biotransformations de ce carbone et de ses durées de stabilisation, avant que le carbone ne quitte le sol essentiellement sous forme de CO₂, produit de la respiration des organismes décomposeurs. Le stock de carbone du sol est dit à l'équilibre quand le flux entrant (par les apports de carbone) est égal au flux sortant (par minéralisation, perte sous forme dissoute ou érosion), résultant en un stock de carbone du sol

constant dans le temps. Les principaux processus qui régulent la dynamique des matières organiques dans les sols sont synthétisés ci-contre figure 2.

Un changement d'usages des terres, ou une pratique agricole ou forestière, sera dit « **stockant** » si sa mise en œuvre engendre une augmentation du stock de carbone du sol en comparaison à la situation initiale. À l'inverse, on parlera de changement d'usages des terres ou de pratique « **déstockant** ». Il est important de noter que l'effet, stockant ou déstockant, rapporté dans l'étude est fondé sur la revue des connaissances d'expérimentations de terrain dans les territoires ciblés. Il ne s'appuie pas sur des travaux de modélisation.

Davantage de détails sont disponibles dans l'annexe « Prérequis à la bonne compréhension des synthèses sur le carbone organique du sol »^I ainsi que dans l'Etude 4 pour 1 000 France (Pellerin et al. (2019)).

^I Disponible sur le site du projet <https://www.etude-4p1000-outre-mer.fr/> dans la rubrique « Documents et livrables ».



Prélèvement de sol en forêt guyanaise pour mesure les stocks de carbone du sol (crédit photo : V. Blanfort)

Présentation des territoires d'étude

Les territoires d'étude sont ceux ciblés par l'accord-cadre, à savoir : la Guadeloupe, la Martinique, la Guyane, La Réunion, Mayotte, Saint-Martin et Saint-Barthélemy. Néanmoins, la quasi absence de données et de connaissances sur le carbone du sol dans ces trois derniers territoires nous a conduits à ne pas les inclure dans le rapport. Les territoires d'étude sont présentés de façon détaillée dans la suite du rapport. Les principaux éléments en lien avec le sujet de l'étude sont abordés ci-dessous.

Les territoires étudiés se situent entre 21° de latitude sud et 18° de latitude nord, dans la bande intertropicale (Figure 3). Les territoires insulaires de l'étude présentent une importante diversité de climats du fait du gradient d'altitude (0 à 1 467 m à la Guadeloupe, 0 à 1 397 m à la Martinique, 0 à 3 070 m à la Réunion) et de l'exposition aux vents (ex : Guadeloupe, Martinique, La Réunion). A contrario, le climat de Guyane, « tropical humide » selon la classification de Köppen-Geiger (Peel et al. (2007)), présente peu de fluctuations de températures au cours de l'année. La Guyane se caractérise par sa géographie continentale et par des reliefs beaucoup moins marqués : plaine côtière à très faibles altitudes (environ 30 m), terres du plateau des Guyanes entre 100 et 200 m d'altitude (point culminant à 860 m).

Au niveau géologique, si la Guadeloupe, la Martinique et La Réunion ont en commun leurs origines volcaniques, elles se distinguent par **des substrats volcaniques d'âges différents**.

À la Guadeloupe, Basse-Terre et les Saintes sont des îles volcaniques d'âge compris entre le Pliocène et l'époque actuelle. Les roches les plus âgées ont été formées il y a 3 millions d'années dans le nord-est de Basse-Terre. D'autres ensembles volcaniques se sont formés au cours du dernier million d'années. La subduction de la plaque Amérique sous la plaque Caraïbes est à l'origine de la formation de l'archipel, tout comme celle de la Martinique. L'archipel de la Guadeloupe se distingue également par la présence de deux ensembles géologiques non volcaniques :

- La Désirade, constituée d'un plateau de roches calcaires
- Grande-Terre, Marie-Galante et Petite-Terre, constituées de plateaux coralliens

La géologie de la Martinique est quant à elle exclusivement volcanique, avec les ensembles volcaniques les plus âgés dans le sud de l'île (entre 24 et 6,5 millions d'années), tandis que le volcanisme du nord de l'île, plus restreint en termes de superficie, est plus récent (< 0,3 millions d'années).

Le volcanisme à La Réunion a pour origine un point chaud volcanique dans l'Océan Indien. L'île a émergé de l'océan il y a 2 à 3 millions d'années, et est donc géologiquement plus jeune que la Guadeloupe et la Martinique. Le massif du Piton des Neiges a été mis en place

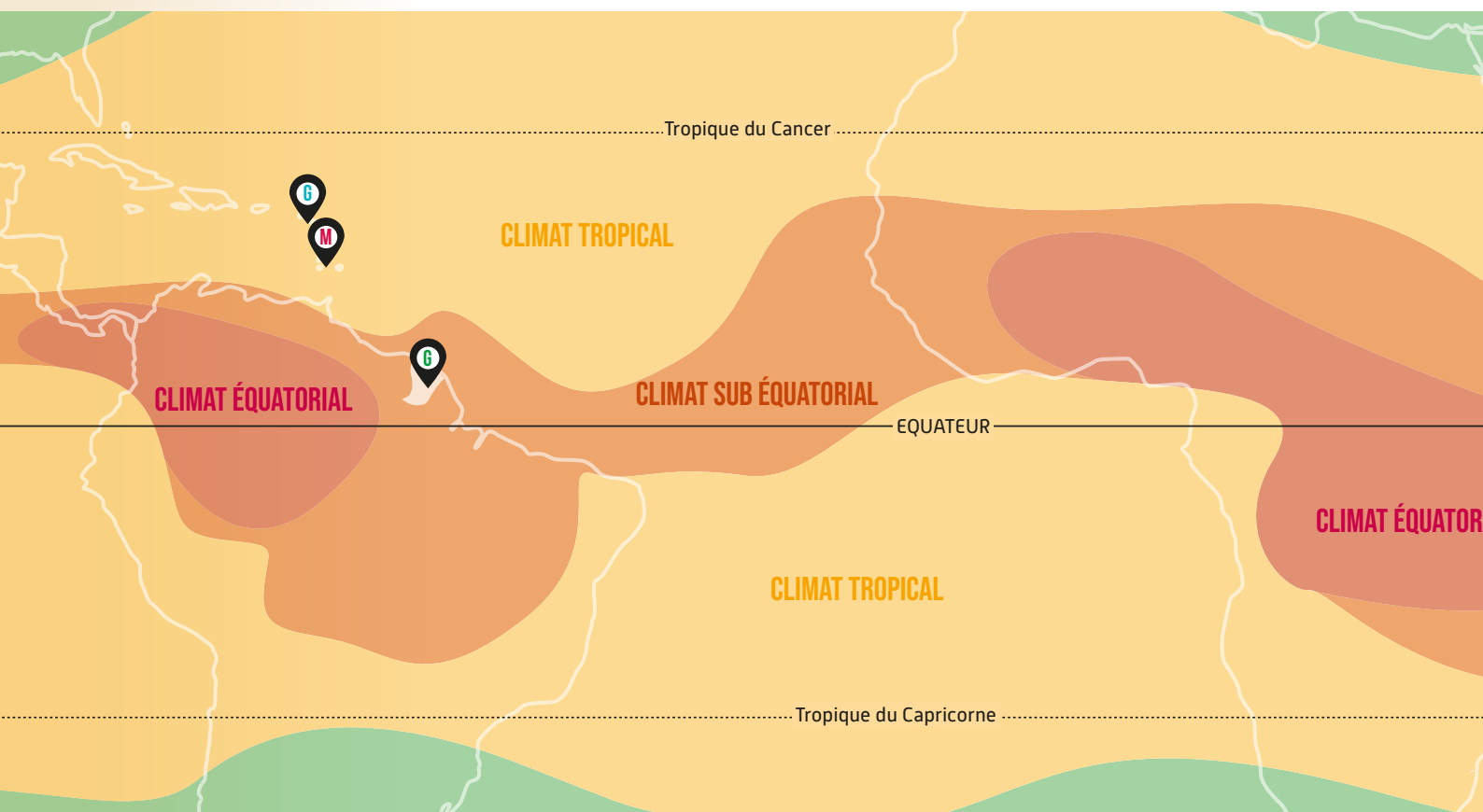


Figure 3 - Localisation des territoires étudiés et leurs climats. (illustration : Adobe Stock / a7880ss)

entre -2,5 millions d'années et - 430 000 ans. Le massif du Piton de la Fournaise est un ensemble plus récent (- 500 000 ans). Chacun couvre près de la moitié de l'île.

Les substrats géologiques de Guyane sont près de 1000 fois plus âgés que ceux des précédents territoires insulaires et sont majoritairement magmatiques, métamorphiques et tectoniques. Plus de 90 % des roches sont en effet datées de 2,2 milliards d'années (BRGM (2011)). Elles sont liées à l'ouverture de l'océan ayant séparé l'Amazonie de l'Afrique de l'Ouest. La Guyane fait partie de la zone géologique du « plateau des Guyanes », un ancien massif érodé étendu de la moitié du Venezuela à l'Etat brésilien de l'Amapa. La pédogenèse de ces territoires est fortement marquée par la géologie, le climat et la topographie.

Ainsi, à la Guadeloupe, le développement pédogénétique des sols est déterminé par la nature des roches, l'âge de la pédogenèse, et la pluviométrie (Sierra & Desfontaines (2018)). Les Ferralsols à halloysites friables, les Andosols à allophanes et les Calcisols peu profonds sont les trois types de sols majoritaires en superficie. À la Martinique, ces deux premières catégories de sols sont complétées des Vertisols (Colmet-Daage et al. (1969)). À La Réunion, la variabilité spatiale de la distribution des sols est importante, en



Paysage volcanique de La Réunion : le Piton de la Fournaise
(crédits photos : Adobe Stock / A. Karnholz)

raison de la variété des roches volcaniques affleurantes, de leur âge, et des gradients de température et de précipitations qui résultent du relief de l'île. Les sols andiques perhydratés, les sols andiques et les sols bruns sont majoritaires en termes de superficie (Raunet (1988)).

En Guyane, la distribution des types de sols est fortement liée aux paysages géomorphologiques (Guitet (2015)). Les sols guyanais sont dominés par les Ferralsols, typiques des milieux tropicaux, subissant une forte altération. Ils sont présents en abondance sur les plateaux. Dans la plaine et les vallées côtières ainsi que dans les reliefs multi-convexes du nord-ouest, les Ferralsols sont en partie remplacés par les Acrisols. Le littoral présente une diversité de sols (Cambisols et Plinthosols, avec les Ferralsols, les Acrisols et des Gleysols plus fréquents).

Ces territoires se caractérisent également par une grande diversité de milieux naturels et cultivés : forêt tropicale humide, mangrove, inselberg, volcan, canne à sucre, jardin de case, abattis-brûlis, pâturage, bananeraie, maraîchage, arboriculture ...

Tous les territoires d'étude sont majoritairement couverts de forêts (> 50 % de la superficie). En Guyane, 92 % du territoire est forestier. La forêt de Guyane couvre plus de 8 millions d'hectares et représente le plus vaste massif forestier tropical d'Europe. A la Guadeloupe, la Martinique et à La Réunion, la surface cultivée représente environ 15 % de la superficie du territoire contre moins de 0,5 % en Guyane. Les principaux usages agricoles en termes de

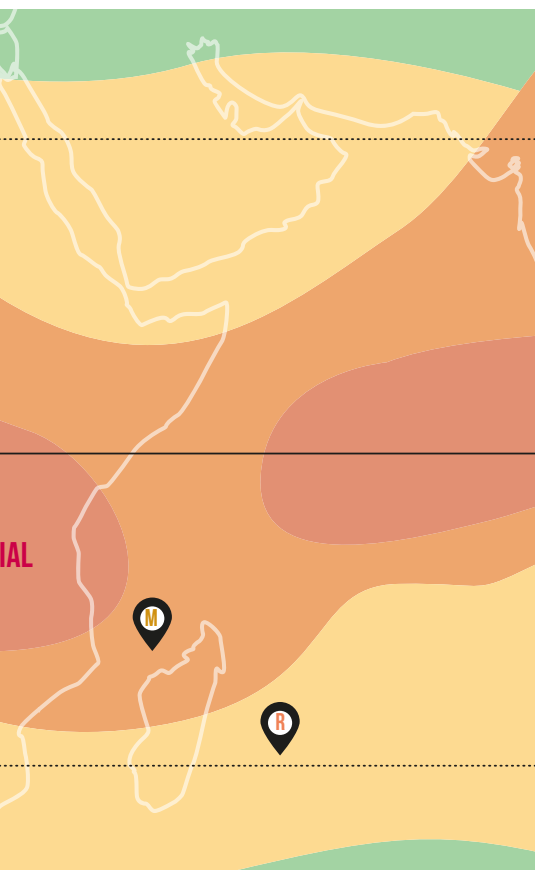
superficie, par ordre décroissant, sont les suivants :

- **Guadeloupe** : canne à sucre, prairies, bananeraies ;
- **Martinique** : prairies, bananeraies, canne à sucre ;
- **La Réunion** : canne à sucre, prairies, maraîchage ;
- **Guyane** : les prairies dominent et représentent plus de 50 % de la surface agricole utile (SAU).

Outre des différences importantes dans les modes d'occupation des terres, leurs dynamiques d'évolution au cours du temps sont très différentes d'un territoire à l'autre. La Guyane se caractérise ainsi par une augmentation marquée de sa SAU depuis plus de 10 ans, au détriment de la forêt. A contrario, la SAU diminue depuis 15 ans à la Guadeloupe et à la Martinique, tandis qu'elle demeure stable depuis 10 ans à La Réunion.

Territoire	Superficie (km ²)
Guadeloupe	1 628
Martinique	1 128
Guyane	83 846
La Réunion	2 512
Mayotte	374
Saint-Barthélemy	24
Saint-Martin	53
France métropolitaine (à titre de comparaison)	551 695

Tableau 1 - Superficie des différents territoires ultramarins de l'étude



Méthodologie



Gouvernance du projet



La réalisation de l'étude s'est appuyée sur une gouvernance constituée de 4 organes aux rôles et compositions distincts, présentés dans le tableau ci-dessous.

Par ailleurs, le pilotage de l'étude a été mené par une **équipe de coordination** composée d'un chef de projet (Julien Demenois, Cirad) et de trois coordinateurs territoriaux, respectivement pour la Guyane (Vincent Blanford, Cirad), les Antilles (Jean-Marc Blazy, INRAE) et l'Océan Indien (Alain Albrecht, IRD).

Le comité de pilotage du projet a permis d'assurer l'interface entre l'équipe de coordination et l'ADEME, le Ministère en charge des Outre-mer, le Ministère en charge de l'agriculture, l'ODEADOM, l'AFD et le Secrétariat Exécutif de l'Initiative 4 pour 1000. Il s'est réuni quatre fois au cours de l'étude.

Le comité technique inter-territoires ultramarins a assuré l'interface entre l'équipe de coordination et les opérateurs techniques et financiers disposant d'une vision inter-territoires ultramarins, afin de s'assurer de l'adéquation entre les choix techniques du consortium et la réalité technico-socio-économique des territoires. Il s'est réuni trois fois au cours de l'étude.

Le comité de suivi scientifique et technique, composé d'experts internationaux, a apporté son regard critique et ses conseils à l'équipe de coordination. Il a été mobilisé pour relire des livrables et formuler des recommandations d'amélioration. A noter que les coordinateurs de l'Etude 4 pour 1000 France, Sylvain Pellerin et Laure Bamière

(INRAE), étaient membres de ce comité afin qu'il bénéficie de leurs retours d'expériences. Il s'est réuni deux fois au cours de l'étude.

Enfin, **des comités locaux d'usagers** ont été mis en place en Guyane et à La Réunion. Les situations sanitaires et sociales à la Guadeloupe et à la Martinique n'ont malheureusement pas permis d'y réunir ces comités. En Guyane et à La Réunion, ils ont permis d'assurer l'interface entre l'équipe de coordination et les opérateurs institutionnels, techniques et financiers du territoire afin de s'assurer de l'adéquation entre les choix techniques du consortium et la réalité technico-socio-économique des territoires. Ils se sont réunis deux fois en Guyane et une fois à La Réunion au cours de l'étude.

Tableau 2 - Présentation des différents comités de suivi de l'étude

	Rôle	Composition
Comité de pilotage	Fournir des avis sur l'orientation et la réalisation de l'étude	ADEME, Ministère en charge des Outre-mer, Ministère en charge de l'agriculture, Ministère en charge de l'écologie, Secrétariat exécutif de l'Initiative 4 pour 1000, ODEADOM, Agence Française de Développement
Comité technique inter-territoires	Apporter une vision inter-territoires et faire remonter les demandes des acteurs locaux	ODEADOM, Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture, ONF, ACTA, IDELE, SOLAGRO, Arvalis, Qualitropic, Terre Inovia, association française d'agroforesterie
Comité de suivi scientifique et technique	Apporter un regard externe sur le contenu scientifique du travail	Denis Angers (Agriculture et Agroalimentaire, Canada), Laure Bamière (INRAE), Luiz Fernando Carvalho Leite (Embrapa, Brésil), Claire Chenu (INRAE), Marc Corbeels (Cirad), Stéphane Guitet (ONF), Yves Montouroy (Univ. Antilles), Sylvain Pellerin (INRAE), Tantely Razafimbelo (LRI, Madagascar), Sébastien Treyer (IDDRI)
Comités locaux d'usagers (Guadeloupe, Guyane, Martinique, Mayotte, La Réunion)	Partager l'information et faire remonter les demandes des acteurs locaux	ADEME régionales, DAAF, DEAL, Ch. d'Agriculture, Collectivité territoriale de Martinique, IT2, ONF, Parc Naturel Régional de Martinique, ValCaCo, Région, Conseil Départemental, Assofwi, Centre technique de la canne à sucre, Société de recyclage, DEAAF, Collectivité territoriale de Guyane (CTG), Guyane Forest Initiative, Solicaz, Guyane Développement Innovation, Parc National de la Réunion, Association réunionnaise de pastoralisme, Ercane, Fédération réunionnaise des coopératives agricoles, RITA Canne, RITA Horti, RITA Elevage, Lycée agricole de Coconi, Saveurs et senteurs de Mayotte, Café cacao mahoré, UCOOPAM, BRGM, EPFAM, CUFR

Volet biophysique de l'étude



Le premier travail pour connaître l'état des stocks de carbone dans les sols ultramarins, leurs évolutions, et les effets des changements d'usages des terres et de pratiques agricoles et forestières, a été de mener un recensement et une analyse bibliographique approfondie des connaissances actuelles, incluant également la littérature « grise » (ex : mémoires de stage).

Afin d'évaluer les effets des changements d'usages des terres et de pratiques agricoles et forestières sur le stock de carbone du sol, **la priorité a été mise sur le recensement des connaissances issues d'expérimentations de terrain dans les territoires ciblés.** Aucun travail de modélisation de l'évolution des stocks de carbone dans les sols n'a été mené dans le cadre de cette étude, la consolidation des bases de données et la calibration des modèles étant des préalables nécessaires. En outre, **un inventaire des bases de données** contenant des informations sur le carbone du sol a été réalisé. Il convient de noter à ce sujet que les données du Réseau de mesure de la qualité

des sols (RMQS) n'ont pu être directement utilisées.

On trouve à cela deux raisons principales : **le faible nombre de points de mesures** dans les territoires ultramarins (67) et **l'absence de re-mesures** à ce jour. Le réseau s'est en effet implanté en 2006 à la Guadeloupe, en 2007 à la Martinique, en 2013 à Mayotte et La Réunion et en 2014 en Guyane. Ces territoires réunissent aujourd'hui 10, 8, 3, 13 et 33 placettes respectivement. Ce recensement a été mené territoire par territoire.

Comme mentionné précédemment, **la quasi absence de données et de connaissances sur le carbone du sol à Mayotte, Saint-Martin et Saint-Barthélemy nous a**

conduits à ne pas inclure ces trois territoires dans le rapport.

En plus de ce travail de recensement de ressources bibliographiques et de bases de données, **quatre ateliers scientifiques internes au consortium Cirad-INRAE-IRD ont été organisés afin de discuter et valider les choix méthodologiques et les résultats.** Les différents comités mis en place pour assurer la gouvernance de l'étude ont également permis de compléter le recensement des connaissances et de discuter des résultats. De manière synthétique, les principales sources de connaissances par territoire sont présentées ci-dessous. **Les détails sont présentés dans les sections du rapport dédiées à chacun de ces territoires.**



Guadeloupe

A la Guadeloupe, la majeure partie des travaux réalisés sur la thématique du stockage de carbone dans les sols concerne **les sols agricoles** (cultures pérennes et annuelles), et ont été initiés au cours du **projet TropEmis** (« Evaluation régionalisée de l'EMIssion et de la séquestration de carbone dans les sols TROPicaux de Guadeloupe »), dont l'objectif était d'analyser et modéliser les interactions entre les émissions/séquestration de carbone et la diversité des milieux et des systèmes de cultures à la Guadeloupe (Sierra et al. (2015)).

Un des aspects novateurs de ce projet a été la calibration/validation d'un modèle mécaniste d'évolution des stocks de carbone organique du sol (**modèle MorGwanik**), adapté aux conditions agropédoclimatiques de la Guadeloupe, outil qui a ensuite été appliqué pour mettre en évidence l'effet des change-



Bananaïe agro-écologique avec plantes de service sur la micro-ferme expérimentale Karusmart J-M. Blazy

ments d'usages et des modes de gestion sur l'évolution des stocks de carbone organique du sol.

La calibration du modèle MorGwanik s'est appuyée entre autres sur une base de données contenant des informations sur les stocks de carbone organique du sol mesurés dans différents contextes.

Cette base de données regroupe des données acquises par un bureau d'études (**CaribAgro**) et des données acquises lors du projet TropEmis. Dans celle-ci, les stocks de carbone organique du sol ont été mesurés dans **1004 parcelles géoréférencées et prélevées entre 1998 et 2014**. Les covariables renseignées sont **le mode d'usage** au moment du prélèvement, **le type de sol**,

ainsi que **l'altitude**. Les stocks ont été mesurés sur la couche 0-25 cm, à partir des mesures de teneurs en carbone organique par combustion sèche et de densité apparente. Les données de cette base ont été exploitées pour la présente étude 4 pour 1000 Outre-mer. A noter toutefois que les données des 1 004 parcelles n'ont pas fait l'objet d'analyses à ce jour permettant de calculer et de spatialiser à l'échelle de l'archipel les stocks de carbone du sol.

L'analyse a permis en revanche d'évaluer l'effet du type de sol, de l'altitude, des propriétés chimiques des sols et de leur mode d'usage sur les stocks de carbone organique observés, sans toutefois que ces déterminants aient été hiérarchisés.





Martinique

À la Martinique, la plupart des sources de données mobilisées dans cette étude proviennent d'un travail de synthèse régionale réalisé au cours du programme de recherche **GESSOL** « Fonctions environnementales et GESTION du patrimoine SOL » (Blanchart & Bernoux (2005) ; Venkatapen (2012)) intitulé « **Déterminants des stocks de carbone des sols des Petites Antilles (Martinique, Guadeloupe). Alternatives de séquestration du carbone et spatialisation des stocks actuels et simulés** ».

Ces travaux ont mobilisé plusieurs sources de données : analyses de sols issues de programmes de cartographie des sols (Colmet-Daage et al. (1969)), analyses de sols issues de travaux de recherche, et analyses de sols spécifiquement réalisés au cours des travaux de Venkatapen (2012).

Au total, **855 profils de sols** ont été exploités durant ces travaux. Étant donné la diversité des sources de données mobilisées lors de ces travaux de synthèse, Blanchart & Bernoux (2005) et Venkatapen (2012) ont eu recours à diverses méthodes pour harmoniser et homogénéiser les données permettant de calculer les stocks de carbone organique du sol pour chaque profil de sol et sur plusieurs couches de sol (0-10, 0-30, et 0-100 cm). Ces données ont été analysées dans le cadre de la présente étude 4 pour 1000 Outre-mer de façon globale, afin de mettre en évidence l'effet des déterminants biophysiques sur les stocks de carbone organique du sol.

Le jeu de données a été prétraité en conservant les points de prélèvements pour lesquels les stocks de carbone organique du sol sur 0-30 cm étaient disponibles. Les covariables suivantes ont été retenues : **mode d'usage des sols, type de sol, et teneur en argile**.

À partir de la géolocalisation des profils, les variables climatiques suivantes ont été extraites en utilisant les données WorldClim (<https://www.worldclim.org/>) à 1 km de résolution : température moyenne annuelle, pluviosité annuelle, évapotranspiration annuelle. L'altitude des points de prélèvement a été obtenue à partir des données IGN (BD Alti à 75 m de résolution, <https://geoservices.ign.fr/bdalti>).



Expérimentation à La Réunion sur les apports de matières organiques dans les cultures de canne à sucre [crédit photo : J. Demenois]

Enfin, l'âge des matériaux parentaux des sols a été extrait des données de la carte géologique à 1/50 000. Un modèle random forest a été construit afin d'analyser et de hiérarchiser l'effet des variables sélectionnées sur les stocks de carbone organique du sol, en utilisant la fonction cforest du package party sur R (Hothorn et al. (2006), Hothorn et al. (2007), Strobl et al. (2008)).



La Réunion

Les travaux sur le stockage de carbone organique dans les sols de La Réunion peuvent être différenciés des précédents par leur échelle d'étude : les déterminants des stocks, leur spatialisation et l'effet des usages et changements d'usage sur les stocks de carbone du sol ont été étudiés à l'échelle régionale, au cours du **projet C@RUN** (Allo (2019) ; Todoroff et al. (2019)).

Ces travaux se sont largement basés sur l'exploitation d'une base de données d'analyses de sols, couplée à une approche de spectrométrie infrarouge permettant de classer les sols et d'évaluer les stocks de carbone du sol à une échelle régionale. Cette évaluation s'est appuyée sur l'analyse d'une base de données d'analyse de sols agricoles de La Réunion appartenant au Cirad (Collinet et al. (2021)), contenant environ 45 000 analyses chimiques réali-

sées entre 1993 et 2017 (Todoroff et al. (2019)). Cette base de données contient uniquement les teneurs en carbone organique des échantillons de sols analysés, prélevés dans l'horizon superficiel, dont l'épaisseur a été considérée comme étant de 30 cm. Les teneurs massiques en éléments grossiers > 2 mm ont été estimées comme nulles, ce qui constitue une hypothèse peu risquée pour la plupart des sols de La Réunion, dominés par les fractions fines granulométriques ; en revanche, certains sols peu évolués (ou développés sur des laves) peuvent contenir des quantités non négligeables d'éléments grossiers : les stocks de carbone dans ces sols seraient donc surestimés. L'estimation de la densité apparente a été réalisée de manière concomitante à une classification spectrale des sols des échantillons de la base de données. La méthodologie détaillée est décrite dans Allo (2019). L'effet des pratiques de gestion sur les stocks de carbone a été étudié au travers de dispositifs expérimentaux à l'échelle de la parcelle, où sont testés l'effet de l'apport de produits résiduels organiques (Jamoteau (2018) Jamoteau et al. (2021) ; Viaud (2019)). Les déterminants des teneurs en carbone des échantillons de sols de la base de données d'analyses des sols du Cirad ont été évalués par Allo (2019) par la méthode des arbres de régression croisés. Les covariables utilisées sont des covariables chimiques mesurées sur ces échantillons (CEC, pH, pHKCl, cations) et des covariables liées à l'environnement de la parcelle et aux pratiques agricoles. Les données disponibles ne concernent que les sols agricoles.



Campagne de prélèvement de sol en Guyane pour évaluer les stocks de carbone du sol des prairies (crédit photo : V. Blanfort)



Guyane

En Guyane, deux travaux font référence pour l'évaluation et la spatialisation des stocks de carbone du sol : celui de **Guitet** (2015) et celui de **Courte** (2019).

Les données présentées dans l'étude sont principalement issues de ces travaux. Guitet (2015) a proposé une méthode d'évaluation des stocks de carbone du sol sur l'ensemble de la Guyane à partir de **33 sites** répartis sur le territoire et de **421 sondages** à la tarière sous forêts sur la couche 0-100 cm du sol.

L'évaluation de la densité apparente des sols a été faite à partir de fonctions de pédotransferts. Courte (2019) a estimé les stocks de carbone du sol sur le littoral guyanais à partir

des résultats d'analyses de sols de **236 sites** et référencés dans trois bases de données différentes : celles construites dans le cadre du projet **CarSGuy**^{II}, du RMQS (www.gissol.fr) et de la base de données **ValSol** (Beaudou et Le Martret (2004)).

Dans ces bases, chaque donnée est associée aux caractéristiques physico-chimiques du sol et à un type de sol sur plusieurs horizons (0-30 cm, 30-50 cm, 50-100 cm et 0-100 cm). La densité apparente n'étant pas toujours disponible dans la base de données Valsol, des fonctions de pédotransferts ont là aussi été utilisées.

A noter toutefois qu'en Guyane aucune analyse permettant une hiérarchisation des déterminants des stocks de carbone du sol n'a été menée à ce jour.

^{II} <https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/891-stocks-de-carbone-des-sols-de-guyane-mesure-et-distribution.html>

Transposabilité des méthodologies agricoles du Label « bas-carbone »

Le travail mené dans le cadre de la présente étude concernant la transposabilité des méthodologies agricoles du Label « bas-carbone » dans les territoires ultramarins s'est focalisé sur deux méthodologies applicables en métropole : la méthodologie relative aux grandes cultures développée par Arvalis^{III} et celle relative à l'élevage bovin développée par l'IDEL^{IV}. Le choix s'est porté sur ces deux méthodologies, celles-ci pouvant potentielle-

ment intéresser une part importante de la surface agricole utile des territoires ultramarins (canne à sucre pour les grandes cultures et prairies pour l'élevage). Le focus géographique a été mis sur La Réunion mais les recommandations formulées se veulent extrapolables au-delà de ce territoire. Le travail a consisté en une lecture critique des méthodologies au regard des conditions et des connaissances disponibles dans les territoires ultramarins.

Dans ce cadre, un travail d'adaptation et de comparaison des performances de modèles d'évolution des stocks de carbone organique du sol a également été réalisé.



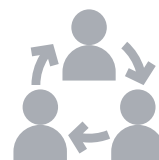
Les modèles retenus étaient MorGwanik, AMG et Roth-C. Un réseau d'essais agromonomiques à La Réunion a été utilisé, qui permet de couvrir l'ensemble des conditions pédoclimatiques et des systèmes de culture (canne à sucre et prairie). Un travail bibliographique a également été mené afin de développer une base de données tropicale de type Bolinder (2007).

^{III} <https://label-bas-carbone.ecologie.gouv.fr/la-methode-grandes-cultures>
^{IV} <https://label-bas-carbone.ecologie.gouv.fr/la-methode-carbonagri>

Paysage de la plaine des Cafres à La Réunion (crédit photo : J. Demenois)



Volet socio-économique et politique de l'étude



Le volet biophysique de l'étude avait pour but d'estimer les stocks de carbone, leur dynamique et leurs déterminants biophysiques. Sa finalité était de mettre en relief l'impact des usages des sols et des pratiques agricoles et forestières sur les stocks de carbone du sol. L'objectif du volet socio-économique et politique était d'en comprendre les déterminants, avec une approche mobilisant les sciences sociales et politiques.

Ce volet comporte deux approches : une approche visant à caractériser les pratiques, usages et leurs déterminants, et une approche visant à comprendre et décrire les politiques publiques ayant potentiellement une influence sur le stockage de carbone dans les sols, et la manière dont les acteurs se saisissent de cet enjeu.

La première étude sur l'analyse socio-économique des pratiques a donné lieu au rapport de stage de fin d'étude de Clara Ponton, stagiaire de l'ENSAE (École nationale de la statistique et de l'administration économique) qui a

réalisé son stage dans l'unité de recherche ASTRO (INRAE) de la Guadeloupe :

- Ponton, Clara, 2022. Étude des déterminants socio-économiques des pratiques agricoles impactant la séquestration du carbone dans le sol en Outre-mer. Mémoire de fin d'études de l'ENSAE, 43 pages.

L'étude en sciences politiques a donné lieu à trois mémoires réalisés par Alma Gavazzi (2022), stagiaire de sciences politiques de l'université de Bordeaux :

- Volume 1 – Etat de l'art : les politiques climatiques européennes sur l'atténuation du changement climatique et le stockage

de carbone dans les sols agricoles et forestiers.

- Volume 2 – L'atténuation du changement climatique : le stockage de carbone dans les sols agricoles et forestiers au sein des politiques publiques nationales et en Guadeloupe.
- Volume 3 – Analyse de la fabrication et de la mise en œuvre des politiques publiques de stockage de carbone dans les sols agricoles et forestiers dans les territoires ultramarins. Etude de cas : la Guadeloupe.

Dans cette partie, nous décrirons les grandes lignes des méthodes et données employées dans chacune de ces deux approches.

Analyse des déterminants socio-économiques des pratiques et usages ayant une influence sur les stocks de carbone

L'objectif finalisé de cette partie était de favoriser les pratiques et usages bénéfiques au stockage de carbone dans les sols, en comprenant quels en sont les déterminants socio-économiques. Les questions auxquelles nous avons cherché à répondre sont les suivantes :

- Quelles sont les caractéristiques socio-économiques des agriculteurs et des types d'exploitations qui mettent en œuvre ces pratiques ?
- Quels sont les déterminants de la mise en place de ces pratiques ?

Pour répondre à ces questions, nous avons tout d'abord réalisé une analyse bibliographique sur les pratiques agricoles dans les territoires concernés (Guadeloupe, Guyane, Martinique, La Réunion). Puis, afin d'avoir des données plus exhaustives sur ces pratiques et surtout sur les variables des exploitations et agriculteurs qui les mettent en œuvre,

nous avons eu recours aux données du dernier Recensement Général Agricole (RGA) pour tous les DROM et, pour certains DROM, lorsqu'elles étaient disponibles, aux données du Référentiel Parcellaire Graphique (RPG) qui contient les déclarations de surface sur les usages faits par les agriculteurs de leurs terres. En effet, Outre-mer, la revue bibliographique a montré que peu de données sont aussi détaillées et leur accès souvent compliqué car il s'agit de littérature grise non publiée. Nous avons donc décidé de mobiliser les données du Recensement Général Agricole qui s'opère tous les 10 ans, à l'échelle de toute la France, DROM compris. Il permet de collecter de nombreuses données sur l'ensemble des exploitations françaises, de manière exhaustive^V. Pour

^V Le RGA est obligatoire pour tout agriculteur professionnel.



chaque exploitation, plus de 900 données sont recueillies sur les superficies cultivées, les cheptels, les pratiques de conduite des cultures et des troupeaux, l'exploitant, la main d'œuvre, les modes de production et de commercialisation, ainsi que les activités de diversification et de transformation des produits. Le dernier recensement agricole a eu lieu en 2020 et

comprend notamment des informations sur des pratiques ayant une influence sur les stocks de carbone du sol, telles que l'utilisation d'amendements organiques, l'intensité de labour, l'agroforesterie. Son contenu complet et explicite à l'échelle de tous les départements d'Outre-mer en faisait un choix judicieux de support d'analyse puisqu'il n'y avait par ailleurs pas d'autres alternatives face à la faible disponibilité des données et que la réalisation d'enquêtes aurait été trop longue et fastidieuse à mettre en place à l'échelle de l'ensemble des DROM, vu les ressources de la présente étude. Les données du recensement agricole, de par leur caractère individuel, sont confidentielles. L'obtention de ces données s'est donc faite via le Centre d'Accès Sécurisé aux Données (CASD). Cet accès à distance se fait via une box dédiée et sécurisée par contrôle biométrique de l'identité de l'utilisateur. La demande d'accès a été obtenue après montage d'un dossier qui a été validé par le CASD par une convention qui finalement a permis de réaliser le traitement des données.

Le recensement agricole est composé de plus de 900 variables. D'après la documentation et au regard de l'objectif de la problématique, il a été possible d'extraire dans un premier temps 150 variables

socio-économiques concernant les pratiques, les exploitations et les exploitants.

Les variables à expliquer sont les suivantes :

- Pratique de l'agroforesterie dans l'exploitation (oui/non),
- Utilisation de compost (oui/non),
- Utilisation de fertilisants animaux,
- Intensité du labour (fort/faible/pas de labour),
- Pratique de l'agroforesterie.

Les variables sélectionnées se répartissent dans les catégories suivantes :

- Pratiques ayant une influence sur les stocks de carbone (les variables à expliquer),
- Données géographiques sur l'exploitation,
- Nature de l'exploitation (taille et spécialisation),
- Données socio-économiques sur le chef d'exploitation,
- Ressources de l'exploitation (irrigation, main d'œuvre, SAU),
- Insertion dans des organisations professionnelles et appartenance à des réseaux,
- Proximité avec l'agroécologie (label biologique, circuits courts, pratiques agroécologiques).

Les variables sont principalement quantitatives (ex : âge, surface) ou binaires (bio ou non, homme ou non, utilisation de compost ou non) ; les quelques variables catégorielles ont été transformées en variables binaires afin de faciliter les analyses et leur intégration aux régressions logistiques.

Afin d'éviter d'incorporer des variables trop peu explicatives, les variables comportant plus de 99% de 0 sur l'échantillon ont été supprimées, réduisant l'ensemble des variables à 130.

Ces données ont ensuite fait l'objet d'un traitement approfondi, selon la méthode suivante :

- statistiques descriptives sur les usages des sols agricoles ;
- statistiques sur les taux de mise en œuvre des pratiques influençant les stocks de carbone du sol ;
- puis régression logistique pour identifier des déterminants socio-économiques de l'adoption des pratiques.

Ces analyses ont été réalisées tous DROM confondus, pour avoir une vision d'ensemble, et ensuite séparément pour chaque territoire.



La régression logistique binaire est un traitement économétrique

qui permet d'estimer la probabilité d'adoption d'une pratique décrite par une variable binaire (**oui/non ; codée 1/0**) et d'identifier les variables socio-économiques déterminantes, c'est-à-dire ayant une influence significative sur l'adoption.

Supposons que l'**agriculteur i** soit confronté à la décision d'adopter la **pratique j** ou à conserver son système de culture, conservation indexée ici par la valeur 0.

Notons **$U_{i,j}$** la **variable non observable** représentant la fonction d'utilité procurée par la pratique j à l'agriculteur i (c'est-à-dire le degré de satisfaction associé à la pratique).

Notons **$Y_{i,j}$** la **variable codant la décision d'adoption** (ou non) de l'innovation j par le planteur i.

$Y_{i,j}$ vaut 1 si l'agriculteur i a choisi d'adopter l'innovation j, sinon **$Y_{i,j} = 0$** , s'il décide de ne pas adopter.

Nous posons :

$$(1) \quad Y_{i,j} = 1 \text{ si } U_{i,j} > U_{i,0} \text{ sinon } Y_{i,j} = 0$$

$$(2) \quad U_{i,j} = \beta X_{i,j} + \varepsilon_{i,j}$$

Avec : **$X_{i,j}$** un vecteur de caractéristiques observées du planteur i et de l'innovation j,
 β le vecteur de paramètres à estimer,
 $\varepsilon_{i,j}$ un terme d'erreur de moyenne nulle représentant les déterminants inobservés.

On suppose que les **$\varepsilon_{i,j}$** sont indépendamment et indépendamment distribués. Chaque paramètre représente le poids moyen du déterminant dans la population étudiée. En supposant que **F**, la **fonction de répartition de $\varepsilon_{i,j}$** , est **logistique et indépendante de X**, nous obtenons en combinant (1) et (2) le modèle logit classique :

$$(3) \quad \Pr(Y_{i,j} = 1) = \Pr(U_{i,j} > U_{i,0}) = \Pr([\varepsilon_{i,j} - \varepsilon_{i,0}] < \beta[X_{i,j} - X_{i,0}]) = F[\beta(X_{i,j} - X_{i,0})] = \frac{\exp[\beta X_{i,j}]}{1 + \exp[\beta X_{i,j}]}$$

Avec : Pr la probabilité d'adoption

$$\text{Soit : } \Pr(Y_{i,j} = 1) = 1 / [1 + \exp(-\beta X_{i,j})]$$



A partir des données de choix observés et des variables associées à ces choix, collectées via le RGA, on peut alors, en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance, estimer le vecteur de paramètres de la fonction d'utilité et leur significativité au sein du modèle d'adoption.

Cependant, comme le nombre de variables explicatives était très important (150), nous avons dû réaliser les tris suivants pour en réduire le nombre et ne **conserver que les 50 variables les plus pertinentes** :

- tri par rapport au lien avec la variable à expliquer en appliquant le test de Kendall et du Chi-2 entre la variable Y et les variables explicatives X ;

- tri pour éviter la colinéarité entre les variables explicatives ;
- tri post-régression pour évaluer les régressions logistiques avec les critères d'information $AIC = -2\log(L) + 2k$ et $BIC = -2\log(L) + k\log(n)^{VI}$;
- et sélection par optimisation : backward, forward pour avoir la meilleure combinaison de variables qui expliquent Y.

Enfin, une fois les régressions effectuées, une évaluation du modèle a été réalisée

VI AIC : Akaike information criterion ; BIC : Bayesian information criterion ; L : vraisemblance ; n : nombre d'observations ; k : nombre de variables

afin de vérifier si notre modèle est statistiquement cohérent et si la sélection des variables est adéquate avec une série de test et d'indicateurs :

- pour estimer la multi-colinéarité dans le modèle, on calcule le FIV (le « facteur d'inflation de la variance ») de chaque coefficient ;
- pour mesurer l'adéquation du modèle, on regarde les pseudo- R^2 qui permettent d'appréhender plusieurs dimensions de la qualité du modèle : la part de la variance expliquée, l'amélioration du modèle comparé au modèle « nul » (sans variable autre que l'intercept) et la qualité prédictive du modèle (pseudo- R^2 de McKelvey et Zavoina, de Nagelkerke et de McFadden).



Bovins et station de mesures de gaz à effet de serre en prairie guyanaise (crédit photo : V. Blanfort)

Analyse de la fabrication et la mise en œuvre des politiques publiques de stockage de carbone dans les sols agricoles et forestiers ultramarins



Les objectifs de l'étude en sciences politiques étaient les suivants :

- **Identifier les politiques publiques** aux différents échelons européen, national et régional et les pratiques sectorielles forestières et agricoles pouvant influencer le stockage de carbone dans les sols,
- **Réaliser une cartographie** des acteurs impliqués dans la construction, la mise en œuvre et le suivi de ces politiques publiques et pratiques sectorielles, et identifier les potentiels conflits d'usages et l'acceptabilité sociale et politique de ceux-ci.

Ce deuxième objectif n'a pu être décliné qu'à la Guadeloupe, faute de moyens humains suffisants. Néanmoins, la méthodologie mise en place pourra aisément être déclinée dans les autres territoires dans le cadre de projets ultérieurs. Par ailleurs, les similitudes dans l'organisation des différentes politiques (européennes jusqu'au niveau régional) laissent supposer des parallèles possibles entre DROM. Il s'agissait, dans ce deuxième objectif, d'analyser la relation entre des politiques publiques européennes, nationales et ultramarines programma-

tiques d'atténuation et de stockage, et la mise en œuvre concrète de leurs instruments par des acteurs locaux dans le secteur agricole guadeloupéen.

La méthode que nous avons suivie est la suivante. Nous avons tout d'abord réalisé un état de l'art des politiques publiques européennes, nationales et ultramarines de l'atténuation du changement climatique par le stockage du carbone dans les sols agricoles et forestiers. Nous avons ensuite, à partir de cet état de l'art, réalisé une cartographie des politiques publiques, des acteurs et des instruments qu'ils mettent en œuvre.

Enfin, nous avons réalisé une étude de cas à la Guadeloupe à travers la mise en place d'une enquête sociologique sur le stockage du carbone au prisme de son instrumentation par les acteurs. Cette enquête de terrain qualitative (entretiens semi-directifs thématiques préparés par une bibliographie de la littérature grise) a été conduite auprès de 33 acteurs des politiques publiques à la Guadeloupe :

- Services déconcentrés de l'Etat (4) ;
- Collectivités locales (1) ;
- Etablissements publics (8) ;
- Chambres consulaires (3) ;
- Centres de recherche (2) ;
- Centres techniques (3) ;
- Coopératives, associations professionnelles (15) ;
- Sociétés anonymes (1).

L'objectif de ce volet de l'étude en sciences politiques était de s'interroger sur la fabrication et la mise en œuvre de politiques publiques de stockage du carbone dans les sols agricoles et forestiers. L'enjeu était de comprendre la mise en relation entre des programmations

internationales et nationales d'atténuation et de stockage et la façon dont elles sont mises en œuvre par les acteurs locaux du secteur agricole. Comment, dans le contexte d'une région insulaire confrontée à des défis très hétérogènes (sanitaires, économiques, environnementaux et climatiques notamment), l'adoption de pratiques agricoles favorisant le maintien et l'accroissement de la capacité de stockage du carbone dans les sols est-elle appréhendée par les acteurs du secteur agricole guadeloupéen, au prisme de l'instrumentation du second pilier de la Politique Agricole Commune (PAC) ?

Dans cette étude, l'approche privilégiée s'inscrit dans l'esprit de la sociologie de Lascoumes, de Le Galès et de Callon. Elle se fonde sur l'observation et l'analyse au « concret » des instruments de l'action publique en matière d'atténuation du changement climatique, dans ses modalités pratiques et matérielles. Il s'agit véritablement d'observer comment les acteurs se saisissent de ces instruments

programmés par le haut, les interprètent, tentent d'en influencer les formes de mise en œuvre, et d'identifier comment et à quelles fins ils les utilisent.

L'hypothèse forte de cette approche est que les jeux d'acteurs, leurs intérêts - parfois concurrents - et leur rapport de force affectent le contenu des instruments et les formes de leur mise en œuvre par la définition de compromis locaux.

Le contenu technique d'un instrument mis en œuvre est contingent des acteurs, c'est-à-dire qu'il dépendra de ce que les acteurs veulent en faire. En effet, un instrument peut être difficilement mis en œuvre si ses destinataires y résistent.

Cette approche met en exergue l'ensemble des mises en problèmes posées par le choix et l'utilisation de différents outils permettant de matérialiser et d'opérationnaliser l'action gouvernementale, qu'ils prennent la forme de techniques, de dispositifs, ou encore de moyens d'opérer.



Récupération de troncs après déforestation
(crédit photo : V. Blanfort)

Principaux résultats de l'étude

Quels sont les stocks de carbone du sol à l'échelle des territoires ultramarins ?

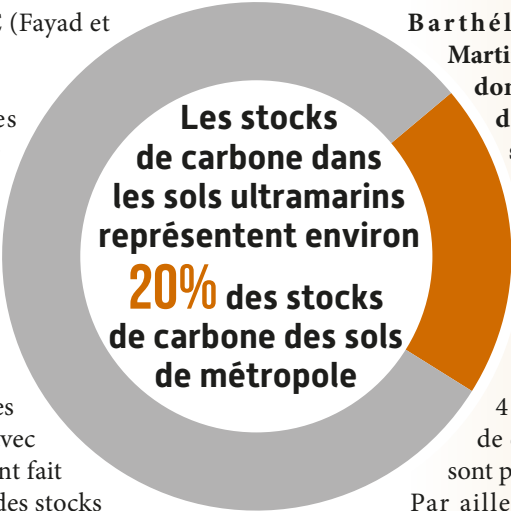
Les stocks de carbone du sol sont partiellement connus dans les sept territoires ultramarins de l'étude. Sur tout ou partie de trois de ceux-ci, la Martinique, La Réunion et la Guyane, ils ont été calculés. Ils représentent environ 20 % des stocks de carbone du sol de métropole.

En Guyane, ils sont, proportionnellement à la superficie du territoire (90 tC/ha en Guyane vs 85 tC/ha en métropole sur la couche 0-100 cm), plus élevés qu'en métropole, avec une estimation comprise entre 600 et 900 MtC (Guitet (2015)), contre une valeur de 4 684 MtC en métropole sur la couche 0-100 cm. Il est utile de rappeler que les stocks de carbone aérien en Guyane représentent 120 % du carbone aérien des forêts de métropole, avec

environ 1 320 MtC (Fayad et al. (2016)).

A La Réunion, les stocks de carbone du sol n'ont été calculés que sur la surface agricole utile du territoire, soit environ 15 % de sa superficie.

A la Guadeloupe, les données existent, avec 1 004 parcelles ayant fait l'objet de mesures des stocks de carbone du sol, mais le calcul à l'échelle de l'archipel n'a pas été mené à ce jour. En revanche, à Mayotte, Saint-



Barthélémy et Saint-Martin, il n'existe pas de données permettant de calculer les stocks de carbone du sol à cette échelle. Ces territoires ne seront donc plus abordés dans la suite du rapport. Ainsi, sur environ 4 200 km², les stocks de carbone du sol ne sont pas connus.

Par ailleurs, l'estimation pour la Guyane présente une forte amplitude liée au faible nombre de points de mesures (236) par rapport à la superficie du territoire (83 846 km²).

Quels sont les déterminants des stocks de carbone du sol à l'échelle des territoires ultramarins ?

Les déterminants des stocks de carbone du sol sont bien connus à la Martinique et à La Réunion. A la Martinique, la teneur en argiles des sols est le premier déterminant des stocks de carbone du sol, suivie par l'usage des sols et le type de sol. A La Réunion en revanche, le type de sol

est le facteur prépondérant expliquant les valeurs de stocks de carbone, quand l'altitude est le second facteur explicatif. A la Guadeloupe et en Guyane, de nombreux déterminants ont été identifiés (ex : types de sol, teneur en argiles, en oxydes) mais sans avoir été hiérarchisés.

Quels que soient les territoires, les déterminants sont plurifactoriels. Globalement, les données disponibles mettent en exergue l'importance de la minéralogie (ex : argiles, allophanes, oxydes) comme déterminant des stocks de carbone du sol, davantage que celle de l'usage des sols, a contrario de l'Hexagone.

Territoire	1 ^{er} déterminant	2 ^{ème} déterminant	3 ^{ème} déterminant
Guadeloupe	Type de sol, altitude, teneur en calcium		
Martinique	Teneur en argiles	Usage des sols	Type de sols
Guyane	Pluviosité +, topographie, teneur en argiles et en oxydes [Fe, Al] +, composition végétale, litière		
La Réunion	Type de sol	Altitude	pH, pH _{KCl} , CEC

Tableau 3 - Déterminants des stocks de carbone du sol à l'échelle des territoires ultramarins. Le signe + indique un effet positif de ce déterminant sur le carbone du sol

Quels sont les stocks de carbone du sol selon les types de sols ?

Dans les territoires insulaires volcaniques, les **Andosols** présentent des stocks de carbone plus élevés que les autres sols, avec des valeurs pouvant dépasser les 200 tC/ha sur la couche 0-30 cm.

En Guyane, les **Ferralsols** présentent des stocks de carbone plus élevés que les

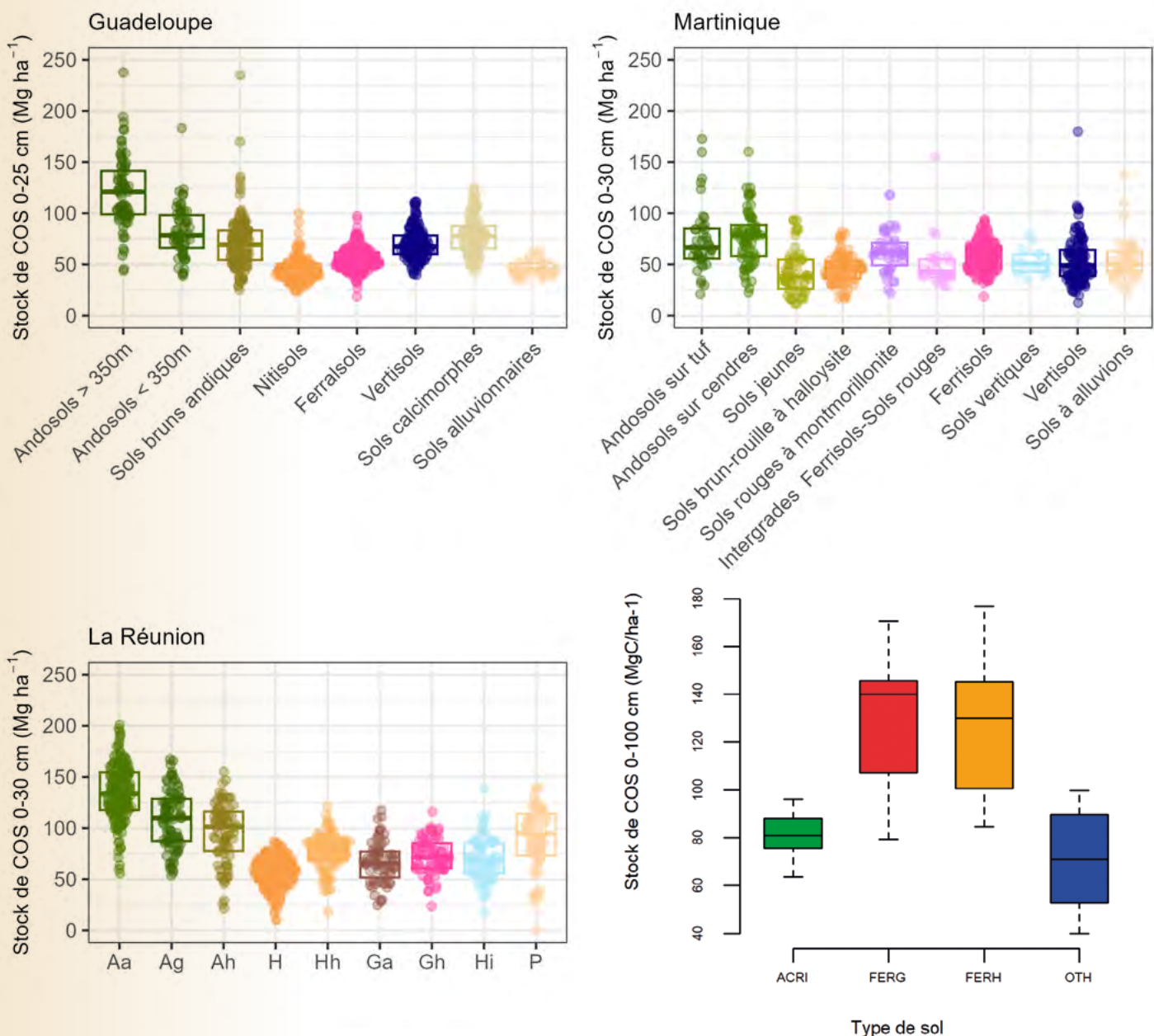
autres sols, avec des valeurs d'environ 130 tC/ha sur la couche 0-100 cm. Ces valeurs élevées dans les sols ultramarins se distinguent de celles couramment mesurées dans les sols de métropole (35 à 80 tC/ha en moyenne).

Les stocks de carbone du sol présentent là encore une grande variabilité par type de

sol. Ce point souligne probablement l'importance de la minéralogie (ex : argiles, allophanes, oxydes) comme déterminant des stocks de carbone du sol. Si la minéralogie est prise en compte dans la classification des types de sol à La Réunion, cela n'est pas nécessairement le cas pour les autres territoires.

Figure 6 - Stocks de carbone du sol par hectare selon le type de sol dans les territoires ultramarins.

(A) Guadeloupe, (B) Martinique, (C) La Réunion, (D) Guyane. Pour La Réunion, les classes de sol dépendent de la minéralogie dominante. Les classes sont les suivantes [Allo (2019)] : Aa : Allophanes, Ag : Allophanes et gibbsite, Ah : Allophanes et halloysite, Ga : Gibbsite et allophanes, Gh : Gibbsite et halloysite, H : Halloysite, Hh : Halloysite et halloysite hydratée, Hi : Halloysite et interstratifiés, P : Sols peu évolués d'apport par l'érosion. Pour la Guyane, les classes de sol sont les suivantes [Guitet (2015)] : ACRI : Acrisol, FERG : Ferric Ferralsol, FERH : Haplic Ferralsol, OTH : Autres types de sols.



Quels sont les stocks de carbone du sol selon les usages des sols ?

Même si l'usage des sols n'est pas le premier déterminant des stocks de carbone du sol, il a un effet sur ces derniers. Par ailleurs, comme l'usage du sol résulte d'un choix humain susceptible de changer, il est intéressant d'analyser les stocks de carbone du sol selon ce paramètre. Ainsi, pour un territoire donné et dans des conditions pédo-climatiques identiques, **il ressort que les stocks de carbone du sol par hectare augmentent selon la séquence suivante : Ananas, Maraîchage et tubercules < Jachères, Jardins créoles < Canne à sucre, Banane, Vergers < Prairies < Forêt (Fig 7).**

En fonction de l'usage des sols, les stocks de carbone du sol par hectare peuvent atteindre des valeurs 2 à 3 fois plus élevées qu'en métropole.

Ainsi, à La Réunion, sous prairie, une valeur moyenne de stock de carbone du sol de 265 tC/ha a été mesurée quand elle est de 80 tC/ha en métropole.

En Guyane, sous forêt, la valeur de stock de carbone du sol varie entre 80 et 176 tC/ha contre 80 tC/ha en moyenne en métropole.

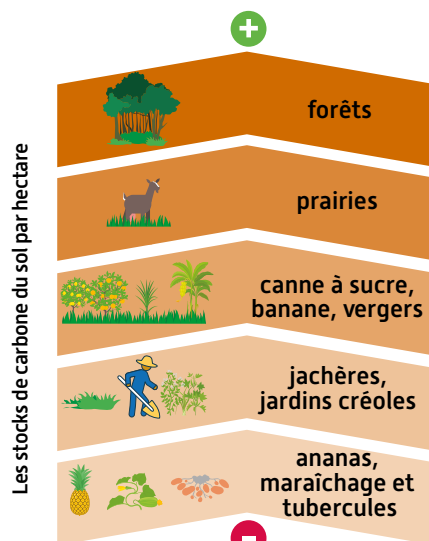


Figure 7 - Stocks de carbone du sol par hectare selon les usages des sols

Sur les 22 valeurs connues de stocks de carbone du sol en fonction de l'usage de sol, la moitié d'entre elles dépassent les 100 tC/ha dans les 30 premiers centimètres du sol. Les stocks de carbone du sol par hectare dans les territoires ultramarins sont donc globale-

ment plus élevés qu'en métropole.

Ceci est particulièrement marqué à La Réunion. A contrario, les valeurs mesurées à la Martinique sont comparables à celles de la métropole.

Alors que la forêt couvre plus de 50 % de la superficie de ces territoires ultramarins, les stocks de carbone du sol forestier ne sont connus qu'à la Martinique et en Guyane. Aucune donnée n'a été recensée à la Guadeloupe et à La Réunion pour ce type d'usage de sol.

Globalement, nous estimons que les stocks de carbone du sol demeurent inconnus pour un tiers des usages de sol sur l'ensemble de ces territoires. En Guyane, cette proportion atteint 70 %, les stocks n'étant connus que sous forêt, prairie et mangrove^{VII}. Aussi, un besoin de connaissances supplémentaires sur les stocks de carbone du sol ressort pour les usages du sol suivants : forêt, mangrove, maraîchage, jardin créole, abattis-brûlis.

La grande variabilité des stocks de carbone du sol pour un usage donné s'explique par l'effet du type de sol. Par conséquent, le croisement « type de sol x usage » est plus pertinent pour expliquer les stocks de carbone du sol dans les territoires ultramarins.

^{VII} Ils sont inconnus pour le verger, la canne à sucre, la banane, l'ananas, le maraîchage, le jardin créole, l'abattis brûlis, la jachère.

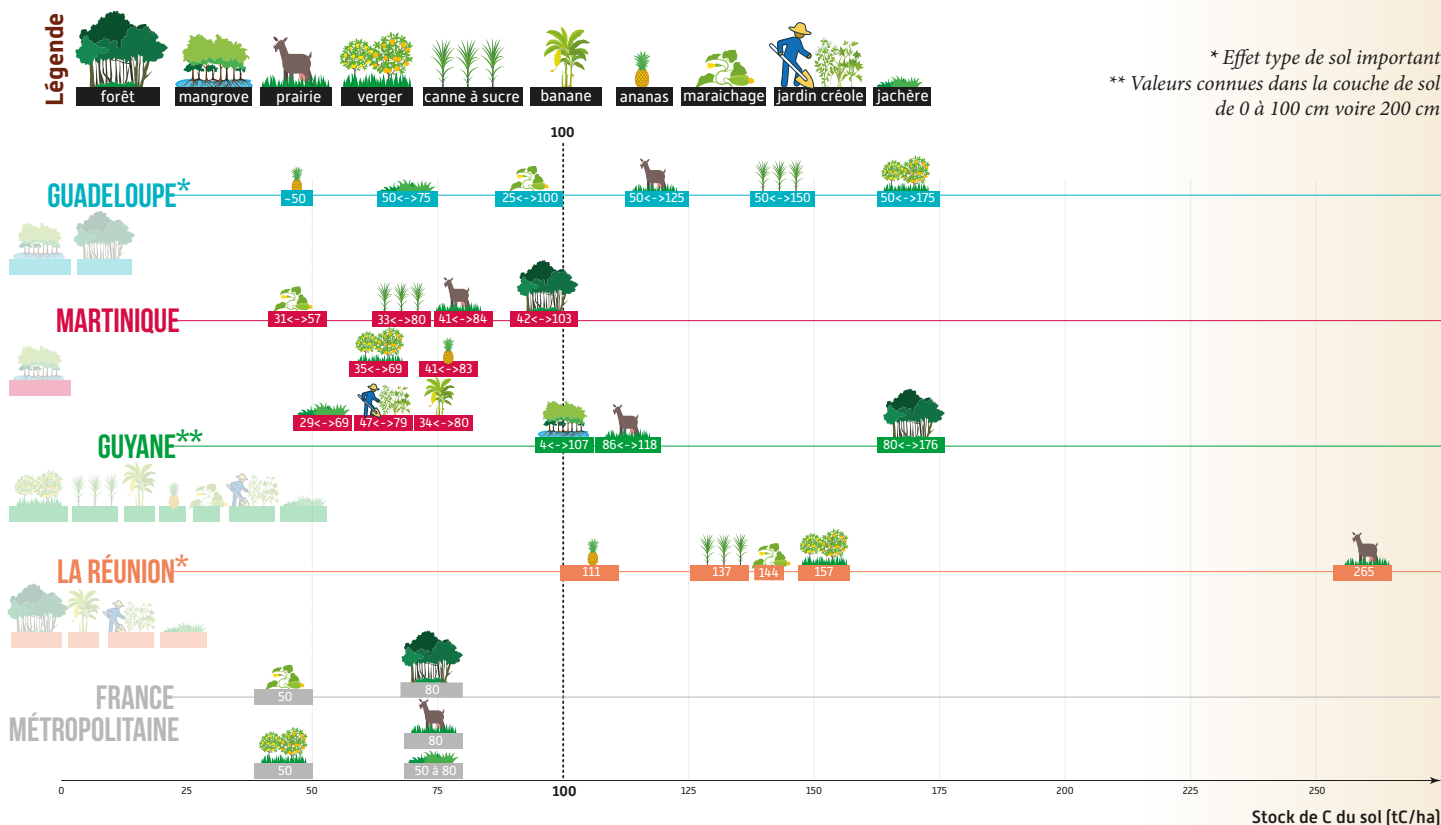


Figure 8 - Stocks de carbone du sol par hectare selon l'usage du sol dans les territoires ultramarins. Les usages du sol pour lesquels les stocks de carbone du sol par hectare sont connus sont représentés en couleurs. Les usages du sol représentés en filigrane sont ceux pour lesquels ces stocks ne sont pas connus. Les valeurs pour la France métropolitaine sont reportées à titre de comparaison et sont issues de ADEME (2014).

Quel est l'effet des changements d'usages des sols sur les stocks de carbone du sol des territoires ultramarins ?

Vingt-sept cas de transitions sont documentés dans les territoires ultramarins, correspondant à huit types de transitions :

- De la forêt vers la prairie ;
- De la forêt vers les cultures annuelles ;
- De la forêt vers les cultures pérennes ;
- De la prairie vers les cultures annuelles ;
- De la prairie vers les cultures pérennes ;
- Des cultures annuelles vers la prairie ;
- Des cultures pérennes vers la prairie ;
- Des cultures pérennes vers les cultures annuelles.

Ces transitions permettent d'évaluer les effets des changements d'usages des sols sur les stocks de carbone du sol. Néanmoins, 80 % des changements d'usages des sols n'ont pas été étudiés. C'est notamment le cas de l'effet du boisement ou encore de l'effet de l'urbanisation (transition vers « infrastructures ») ou de la restauration ou de la dégradation de zones humides (transition vers ou depuis « terres humides ») qui constituent des changements d'usages pouvant a priori avoir un effet important sur les stocks de carbone du sol et dans la biomasse.

Dans des territoires en forte évolution en

termes d'occupation (ex : conversion de forêt en Guyane, urbanisation aux Antilles), ceci constitue une limite à l'évaluation de l'impact de ces choix d'aménagement sur les stocks de carbone du sol à cette échelle.

A l'exception des changements d'usages des sols vers la prairie qui induisent une augmentation de stocks de carbone dans les sols, tous les autres changements d'usages des sols documentés provoquent un déstockage du carbone du sol. Il convient néanmoins de noter que les transitions vers la prairie ont fait l'objet de peu d'études.

Les tableaux suivants donnent de manière détaillée les résultats de ces études.

On en retiendra que :

- Pour les transitions documentées, les amplitudes des variations de stocks de carbone du sol sont grandes (> 10 %), avec des variations plus importantes à La Réunion ;
- La conversion des forêts en cultures annuelles ou pérennes entraîne une baisse de stock de carbone du sol ;
- La conversion des cultures pérennes (banane, canne à sucre) vers des cultures maraîchères ou d'ananas

entraîne une baisse de stock de carbone du sol ;

- Seule la conversion vers les prairies peut entraîner une augmentation de stock de carbone du sol.
 - Les données de ces études proviennent de dispositifs variés :
 - Comparaisons de parcelles dans des situations pédoclimatiques proches mais avec des usages différents. L'âge des parcelles n'est généralement pas renseigné (hypothèse de stabilité des stocks de carbone du sol lors du calcul de variations de stocks liées aux changements d'usage) ;
 - Etudes de chrono-séquences. Les mesures de stocks de carbone du sol sont réalisées dans des parcelles ayant connu un changement d'usage dont l'âge est connu. La comparaison est faite avec une ou des parcelles témoins adjacentes ;
 - Suivis diachroniques. Les mesures des stocks de carbone du sol sont faites avant et après changement d'usage.
- Toutes ces études se concentrent sur les horizons superficiels (0-30 cm), à l'exception de celle sur la transition Forêt vers Prairie (0-100 cm).

Usage des sols initial \ Usage des sols post-transition	Forêt	Prairie	Cultures annuelles	Cultures pérennes	Terres humides	Infrastructures	Autres terres
Forêt		1	3	5	nd	nd	nd
Prairie	nd		4	2	nd	nd	nd
Cultures annuelles	nd	1		nd	nd	nd	nd
Cultures pérennes	nd	1	8	2	nd	nd	nd
Terres humides	nd	nd	nd	nd		nd	nd
Infrastructures	nd	nd	nd	nd	nd		nd
Autres terres	nd	nd	nd	nd	nd	nd	

Tableau 4 - Effets des changements d'usages des sols sur les stocks de carbone du sol des territoires ultramarins. Les chiffres indiquent le nombre d'études disponibles pour la transition considérée. Les couleurs indiquent l'effet sur les stocks de carbone du sol : augmentation en vert ; diminution en rouge. nd : données non disponibles

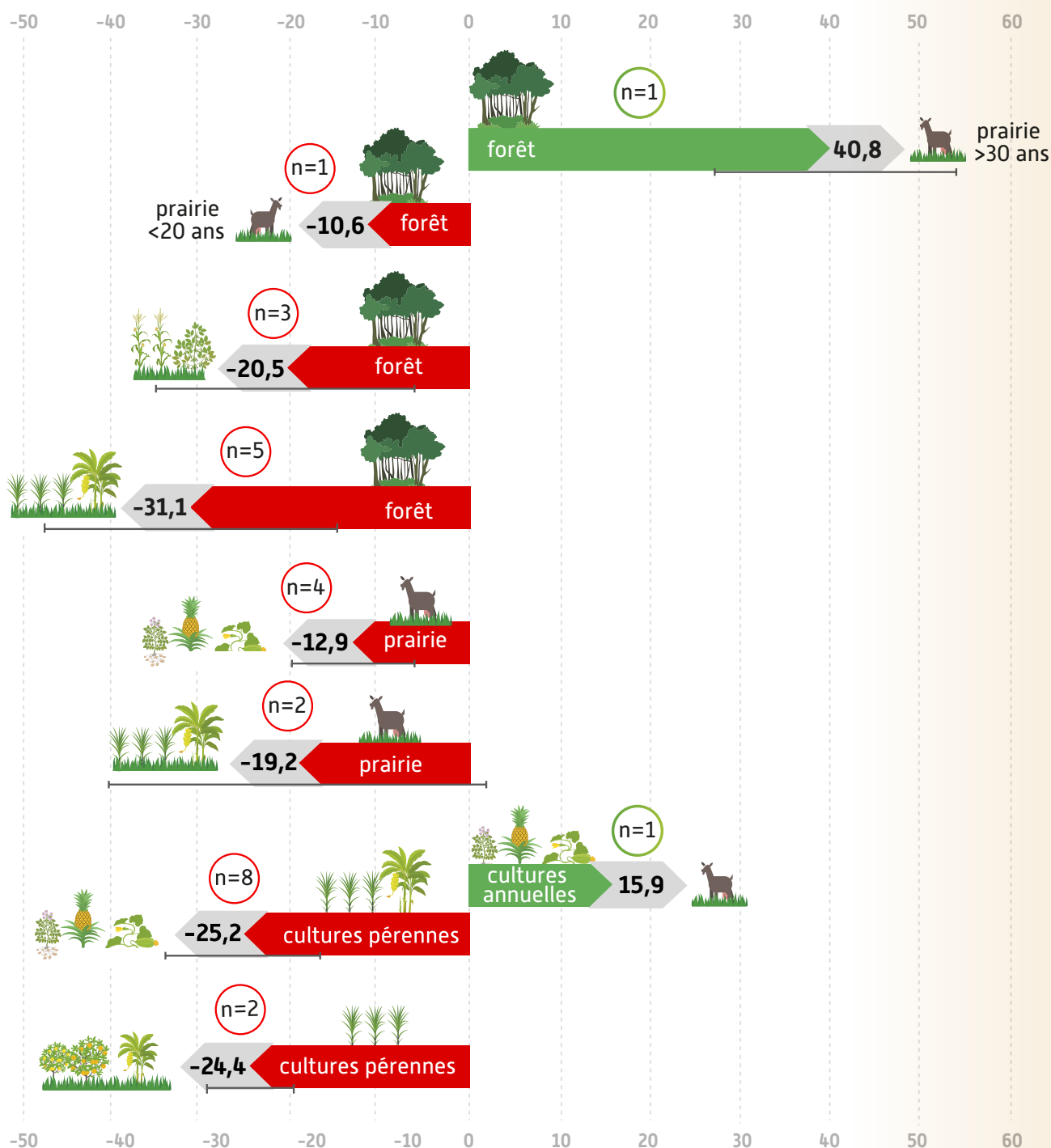
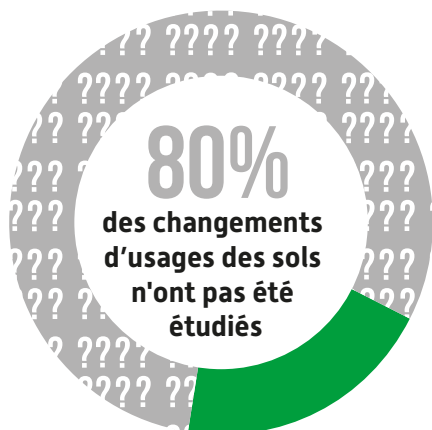


Figure 9 - Variation du stock de carbone des sols en pourcentage de la situation initiale selon le type de changement d'usages du sol dans les territoires ultramarins. Le nombre d'études disponibles est indiqué dans un cercle (n=). L'écartype est représenté par le trait noir.

LA FORÊT GUYANAISE ET LES ENJEUX DES CHANGEMENTS D'USAGE SUR LE STOCKAGE DU CARBONE AÉRIEN ET DU SOL

La forêt guyanaise constitue le plus grand massif forestier de l'Union européenne (81 000 km², soit 97,3% de la Guyane) avec des enjeux majeurs :

- de conservation, au regard de son étendue et de la biodiversité qu'elle abrite ;
- de régulateur climatique régional ;
- de stockage de carbone.

La biomasse aérienne forestière constitue un stock de carbone aérien de 1 320 millions de tonnes qui représentent 120 % du carbone aérien des forêts métropolitaines. Il faut y ajouter le stock de carbone organique contenu dans les sols, compris entre 600 et 900 MtC [Guitet (2015), et plus globalement le stock de carbone organique du sol de l'ensemble du territoire, qui représente 19 % des stocks de carbone des sols de métropole.

Si la biomasse forestière constitue un stock de carbone avéré, est-elle pour autant un puits de carbone absorbant du CO₂ de l'atmosphère à travers la photosynthèse ?

Les résultats de la tour à flux Guyaflux et les inventaires forestiers du réseau Guyafor (station de recherche de Paracou) confirment ce rôle de puits. La tour à flux a mesuré un flux de carbone entrant dans l'écosystème de 3 tC/ha/an en moyenne

l'origine d'importantes pertes de carbone aérien (dûes à l'exploitation et aux impacts indirects) qui mettent plusieurs décennies à se reconstituer.

Au-delà des valeurs de ces pertes brutes en carbone, il est indispensable d'évaluer l'impact de ces changements d'utilisation des terres, par l'établissement de bilans carbone qui intègrent ces références ainsi que les émissions de GES générées par ces activités (par exemple, les émissions de CH₄, N₂O, CO et NO_x ont lieu lors de la combustion de la biomasse forestière). **La méthodologie de calcul des émissions liées à la déforestation repose sur les recommandations internationales du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2006, 2019).** Ces recommandations permettent également de calculer les variations de stocks de carbone entre deux états (avant et après déforestation par exemple). Concernant l'évaluation des transitions de la forêt vers des surfaces agricoles, un outil européen (ACCT - Agri Climate Change Tool) permettant la réalisation de bilans carbone à l'échelle d'une exploitation agricole, a été adapté à la Guyane (ACCT DOM Guyane). L'outil prend en compte le stockage de carbone dans le sol en mobilisant les références acquises sur les dispo-

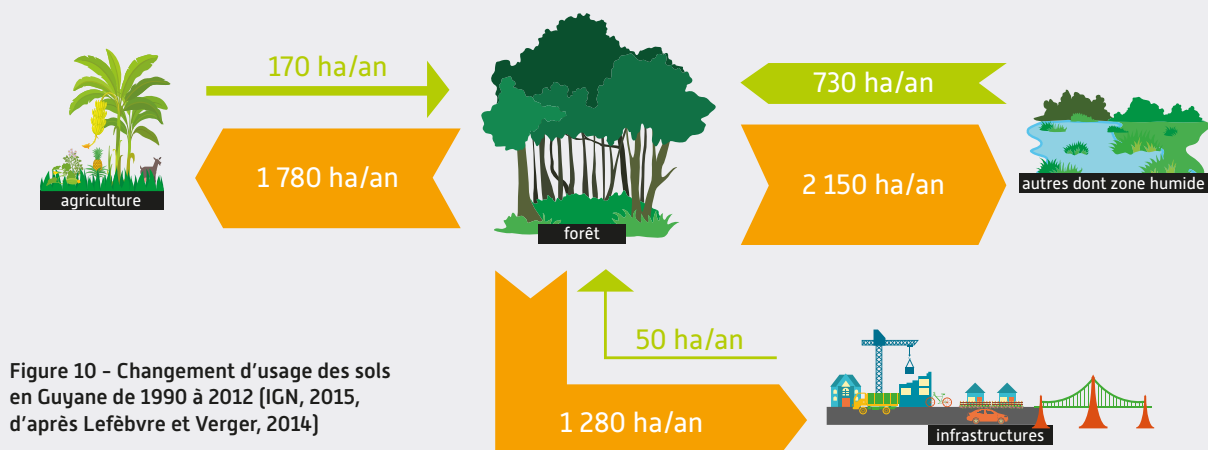


Figure 10 - Changement d'usage des sols en Guyane de 1990 à 2012 (IGN, 2015, d'après Lefèvre et Verger, 2014)

entre 2004 et 2015, et les inventaires montrent une augmentation du stock de carbone de la biomasse aérienne. Cependant, les études menées à plus large échelle en Amazonie suggèrent que ce puits de carbone ralentit et risque même de s'inverser sous l'effet du changement climatique en entraînant des pertes de 3,5 à 5 tC/ha/an dans la biomasse aérienne forestière. Il serait aussi à l'origine d'un allongement des temps de régénération de la biomasse après coupe.

Les stocks de carbone de « l'Amazonie française » sont aussi impactés par les changements d'utilisation des terres. Le développement de la Guyane se réalise en effet essentiellement à partir de la défriche de sa forêt, qui entraîne des pertes nettes de carbone de la biomasse aérienne, et dans la plupart des situations, une diminution des stocks de carbone du sol. **Trois secteurs principaux** ont été ou sont impliqués dans ces dynamiques : le barrage hydroélectrique de Petit Saut (mis en eau en 1994), l'orpillage, et bien sûr l'agriculture qui est considérée comme une des priorités d'un développement endogène. **Actuellement, plus de 4 000 ha de forêts sont défrichés chaque année en Guyane.** L'exploitation forestière est aussi à

sitifs CARPAGG et CarSGuy. L'objectif est d'identifier des systèmes agricoles plus performants et efficaces sur le plan environnemental, et des leviers d'actions adaptés aux exploitations agricoles de ce territoire.

Concernant les systèmes d'élevage, la Guyane illustre ainsi très bien le potentiel des systèmes fourragers des tropiques humides, pour produire des viandes de qualité (à l'herbe), avec des coûts environnementaux largement inférieurs à ceux des systèmes plus intensifs, courants dans les zones tempérées.

Par la double appartenance de la Guyane au contexte amazonien et aux cadres réglementaires européen et français, et du fait que son développement s'appuie en partie sur la déforestation, l'agriculture guyanaise doit s'inscrire dans une démarche d'atténuation du changement climatique. Le changement d'utilisation des terres en Guyane est un élément non négligeable de la comptabilité nationale carbone. Il s'agit plus globalement de s'inscrire dans la Trajectoire Outre-mer 5.0, notamment l'objectif Zéro carbone, en conformité avec les engagements internationaux en matière de climat de l'Accord de Paris, ou de développement durable de l'Agenda 2030.



Quel est l'effet des changements de pratiques sur les stocks de carbone du sol des territoires ultramarins ?

Neuf pratiques agricoles différentes ont été étudiées sur plusieurs années pour évaluer l'effet (+, =, -) de changements de pratiques agronomiques sur les stocks de carbone du sol dans les territoires ultramarins :

- +++ Substitution de la fertilisation minérale des bananes par une fertilisation organique
- = Inclusion de rotation maraîchère ou de jachère pâturée dans les plantations de canne à sucre ou de bananes, avec ou sans fertilisation organique
- ++ Arrêt du brûlis des résidus de canne à sucre
- = Remplacement du travail superficiel du sol par le non travail du sol dans les cultures de maïs et de soja

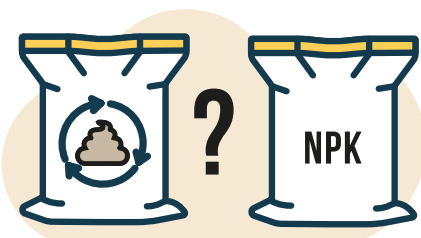
- ++ Remplacement du travail profond du sol par un travail superficiel du sol en maraîchage
- ++ Substitution de la fertilisation minérale en maraîchage par une fertilisation organique
- ++ Substitution de la fertilisation minérale des prairies par une fertilisation organique
- ++ Inclusion d'arbres dans les prairies (agroforesterie)
- ++ Revégétalisation de site minier

resterie (système sylvo pastoral) ou pour la revégétalisation, induit également une augmentation des stocks de carbone du sol. Les données de ces études proviennent de dispositifs variés :

- Comparaisons de parcelles dans des situations pédoclimatiques proches mais avec des pratiques différentes.
- Suivis diachroniques. Les mesures des stocks de carbone du sol sont faites avant et après changement de pratiques
- Modélisations avec MorGwanik

Toutes ces études se concentrent sur les horizons superficiels (0-30 cm), à l'exception de celle sur la revégétalisation de site minier (0-100 cm).

Pour les pratiques documentées, les amplitudes des variations annuelles de stocks de carbone du sol sont, le plus souvent, supérieures à 1 tC/ha/an (Figure 11). Ces valeurs constituent des moyennes dans des études de durées variables. Les pertes de carbone du sol peuvent être rapides, tandis que les



augmentations nécessitent plusieurs années. La substitution de fertilisation minérale par la fertilisation organique induit une augmentation des stocks de carbone du sol, quels que soient le type de culture. Néanmoins, cette pratique pose la question de la disponibilité et de l'origine de cette matière première.



En maraîchage, la limitation du travail du sol permet de limiter la perte de carbone du sol en comparaison d'un travail profond du sol. En prairie et sur les sites miniers, la plantation de ligneux, que ce soit en agroforesterie

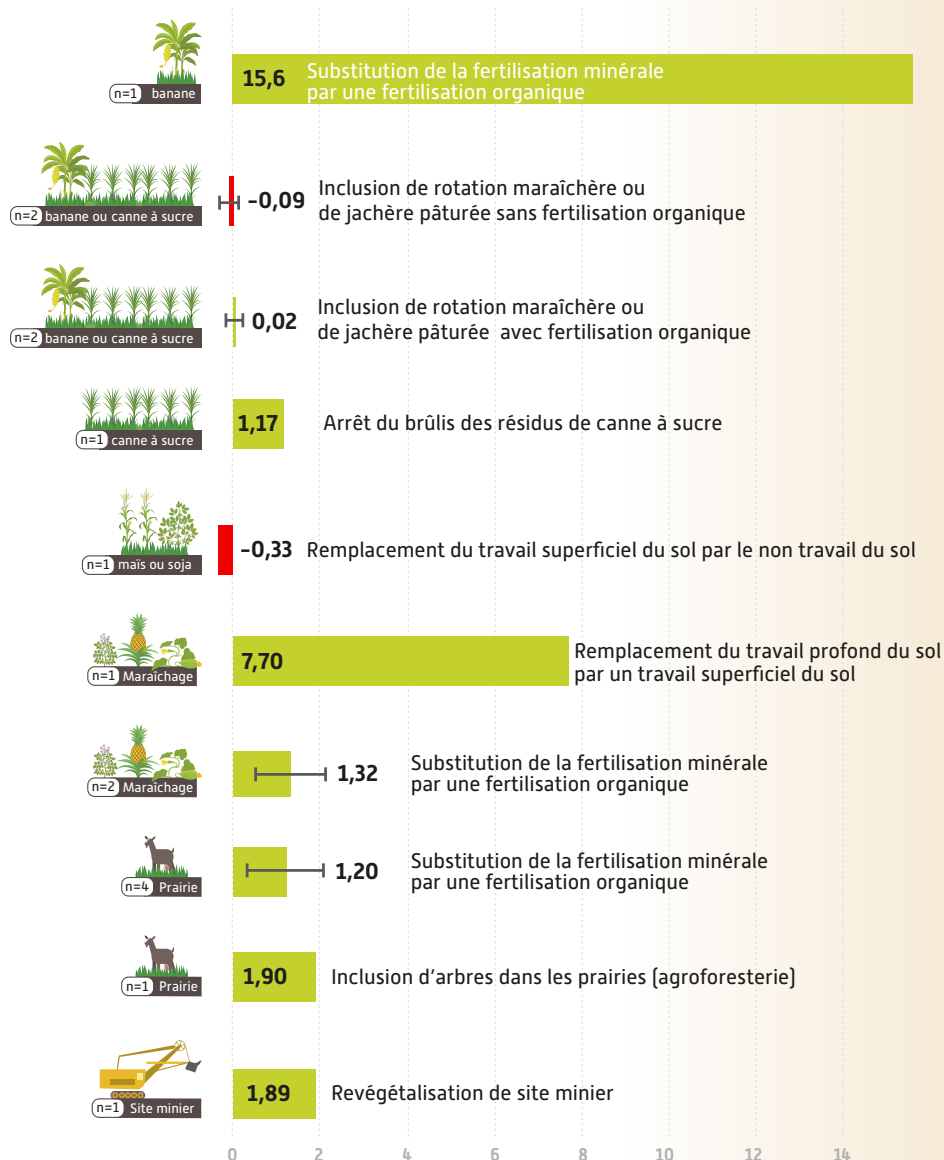


Figure 11 - Variation annuelle du stock de carbone du sol en tonne de carbone par hectare et par an selon le type de culture et de pratiques agricoles dans les territoires ultramarins. La 1^{ère} pratique mentionnée correspond à celle après changement, la 2^{ème} à la pratique initiale. Le nombre d'études disponibles est indiqué entre parenthèses (n=). L'écartype est représenté par le trait noir.

TRANSPOSABILITÉ DE MÉTHODES DU LABEL « BAS-CARBONE » AUX TERRITOIRES ULTRAMARINS : EXEMPLE DE LA RÉUNION

Les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté de 91 % dans les territoires ultramarins entre 1990 et 2019 (Citepa, décembre 2021 - Format Outre-mer). Les pratiques agricoles représentent un levier majeur de réduction de ces émissions de GES, et ont ainsi fait l'objet d'une attention particulière dans la présente étude.

Les pratiques réductrices d'émissions et bénéfiques au stockage de carbone dans le sol peuvent être favorisées par des dispositifs d'incitation économique ciblant la certification de produits élaborés ou de crédits carbone [Demenois et al. (2022)].

En 2018, le ministère de la Transition Écologique a mis en place le Label « bas-carbone » (LBC) dont les objectifs sont de contribuer aux engagements climatiques de la France en mettant en relation des porteurs de projets vertueux en matière d'atténuation des changements climatiques avec des financeurs dans les secteurs agricoles ou forestiers. La certification d'un projet par le Label « bas-carbone » s'appuie sur la mise en œuvre d'une méthodologie permettant d'évaluer l'impact climatique du projet et ses co-bénéfices. **Bien que 9 méthodes existent actuellement et que 11 soient en cours d'évaluation pour les secteurs agricoles et forestiers, aucune n'est applicable en l'état dans les territoires ultramarins.** L'objectif de notre travail a ainsi été d'analyser les modalités de transposition des méthodologies du Label « bas-carbone » dans le contexte des territoires ultramarins.

Pour des raisons pratiques, l'étude s'est focalisée sur la transposabilité des méthodes Grandes Cultures [Arvalis] et Carbon Agri [IDELE] aux secteurs de la canne à sucre

et de l'élevage à La Réunion. Le cadre normatif de ces méthodes ainsi que leur approche de comptabilisation sont parfaitement transposables au contexte ultramarin. Les critères d'éligibilité et la durée des projets peuvent être adaptés au cas par cas, sans difficulté, en tenant compte des spécificités des territoires et des filières. Des propositions ont été formulées pour la canne à sucre et l'élevage concernant des scénarios de référence à prendre en compte et la constitution de consortiums de rédaction de nouvelles méthodes pour ces filières tropicales.

**LABEL BAS
CARBONE**

La pertinence des leviers de réduction des émissions de GES proposés dans les méthodes métropolitaines a été

évaluée dans nos contextes [Tableau 5]. Cette analyse fait ressortir qu'un levier important est l'ajustement de la dose fertilisante qui permet, d'une part de diminuer les émissions de N_2O en cas de sur-fertilisation, et d'autre part d'augmenter les stocks de carbone du sol par l'augmentation des résidus de récolte dans les situations actuelles de sous-fertilisation.

La taille moyenne des exploitations agricoles d'Outre-mer est de 5 ha contre 69 ha en métropole, ce qui limite fortement la capacité d'investissement et l'accès à la mécanisation. De ce fait, la diminution des émissions de GES associées aux combustibles fossiles est peu pertinente. La plupart des leviers associés à la fertilisation

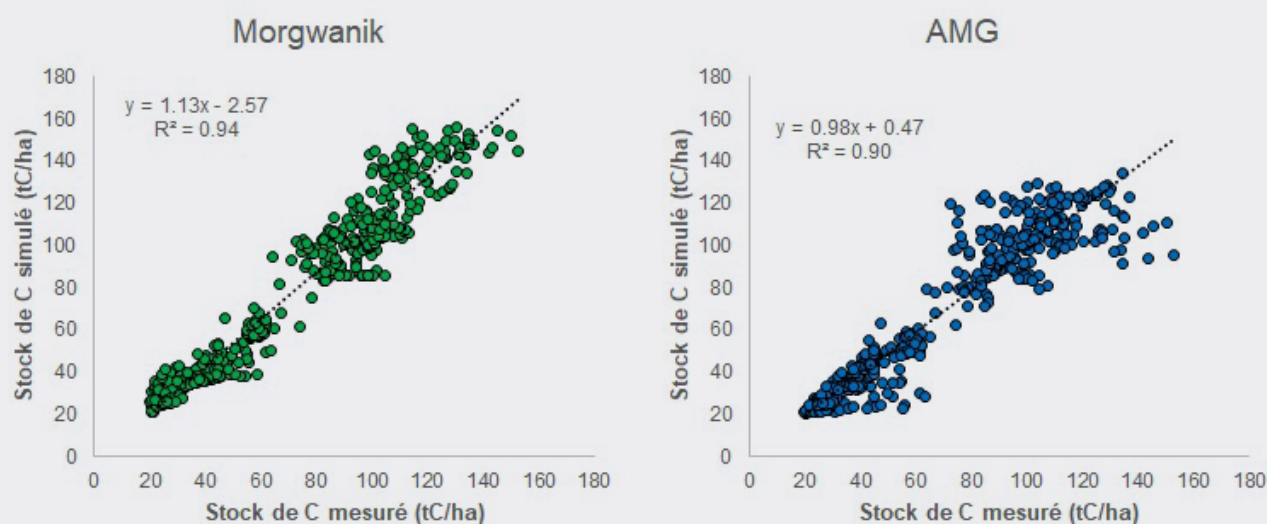


Figure 12 – Force prédictive des trois modèles sur l'ensemble du jeu de données réunionnais



Plantation de canne à sucre en Guadeloupe
[crédit photo : J-M. Blazy]

azotée ne sont également pas envisageables pour les mêmes raisons (achat d'engrais améliorés ou enfouissement mécanique). Il n'y a pas de post-traitement de ces productions et la diminution des émissions de GES en aval de l'exploitation n'est pas non plus envisageable.

En termes de stockage de carbone dans les sols, **un levier est le recours aux matières fertilisantes d'origine résiduaire** (lorsque celles-ci ne sont pas déjà valorisées comme amendement agricole) qui offre de surcroît l'avantage de limiter l'importation des engrais de synthèse. Globalement, la mobilisation de ces leviers dans les territoires ultramarins se heurte à un niveau de référencement et d'outillage ainsi qu'à une présence des services d'appui moins élevés qu'en métropole.

Il convient de garder à l'esprit que, de façon générale, les facteurs d'émissions valables en conditions tropicales sont moins bien renseignés et donc plus incertains que ceux existants en conditions tempérées [Koch & Salou, (2022)]. L'évolution des stocks de carbone du sol sur la durée des projets est réalisée dans la méthode Grandes Cultures à partir de modèles de simulations de stockage du carbone dans les sols.

De nombreux modèles de ce genre ont été développés, principalement en milieu tempéré, et trois d'entre eux ont été testés dans le cadre de cette étude :

- 1) **MorGwanik**, une application informatique sur Excel destinée à calculer le bilan de matière organique à un pas de temps annuel [Sierra et al. (2015)] ;
- 2) **AMG**, un modèle conçu pour simuler la dynamique du carbone organique du sol à un pas de temps annuel [Clivot et al. (2019)] ;
- 3) **RothC**, un modèle international de renouvellement du carbone organique dans la couche arable qui tient compte des effets du type de sol, de la température, de l'humidité du sol et de la couverture végétale sur le processus de renouvellement [Coleman et Jenkinson (1996)].

L'exercice de modélisation s'est porté sur 9 essais long-terme réunionnais qui recoupent 7 fertilisants organiques, 3 types de cultures (canne à sucre, prairie et maraîchage) et l'ensemble des conditions pédoclimatiques de l'île, représentant un total de 550 mesures annuelles de carbone dans l'horizon de surface du sol.

Les performances globales se sont montrées les meilleures pour MorGwanik, avec une erreur relative globale de 17 % [RRMSE relative root mean squared error], puis pour AMG [24 %] et enfin RothC avec une erreur relative globale de 31 %. Le biais de simulation est en revanche le plus important avec MorGwanik qui a tendance à surestimer le stockage de carbone dans les sols, tendance également observable pour RothC. AMG présente les meilleures performances de ce point de vue, avec un coefficient directeur de 0,98.

Ces résultats obtenus à La Réunion montrent que l'utilisation du modèle AMG représente à ce jour l'option la plus prometteuse en termes de performances et d'adaptabilité dans le cadre du Label « bas-carbone ». Le modèle Morgwanik qui a été adapté au territoire de la Guadeloupe reste quant à lui le plus pertinent pour le développement d'une méthode LBC dans ce territoire.

Le rapport complet sur l'état des lieux de l'applicabilité et recommandations pour l'adaptation des Méthodes Grandes Cultures et Carbon Agri du Label "Bas-Carbone" au territoire réunionnais est disponible ici : <https://agritrop.cirad.fr/604368/>

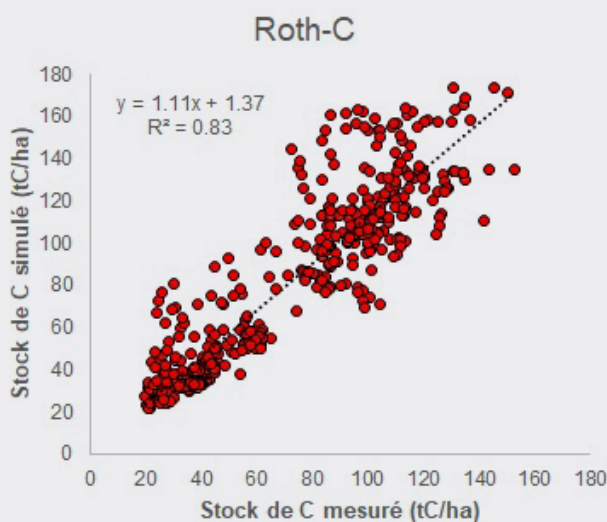


Tableau 5- Synthèse de la transposabilité des leviers de réductions des émissions de la méthode du Label « Bas-Carbone » Grandes Cultures. **En vert** les leviers possibles (O), **en rouge** inadapté (N), **en orange** envisageables (E) mais incompatibles avec la réalité du terrain actuellement et en gris les situations à approfondir

Stratégie	Levier	Pratique	Transposabilité à La Réunion		Freins
			GC	Carbon Agri	
Diminution des émissions de GES associées à la fertilisation azotée	Réduire la dose d'azote minéral apportée	Ajustement du calcul de dose	O	O	Technicité et manque de formation
		Prise en compte des conditions climatiques pour les apports	O	E	Manque des données météo précises
		Utilisation d'outils de pilotage	N	O	GC: Manque de méthodes CarbonAgri: Diffusion et formation des conseillers et agriculteurs
		Modulation intraparcellaire	N	N	GC: Mécanisation nécessaire non disponible
	Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé – Agir sur la nitrification / dénitrification	Utilisation d'inhibiteurs de nitrification	N		Incompatibilité pratiques actuelles
		Chaulage des sols acides [objectif 6.8]	N		Incompatibilité tropiques : Sols majoritairement acides [<5.5]
		Utilisation de formes d'engrais moins émettrices	E		Impossibilité d'importer du nitrate à la réunion (économique et normatif)
		Enfouissement des apports organiques et minéraux	E	O	GC: Mécanisation nécessaire peu disponible CarbonAgri: Communication et formation des agriculteurs
	Introduire des légumineuses	Introduire des légumineuses ou des cultures/variétés à plus faible besoin en N	E	O	GC: Faisable selon cultures, canne sucrière n'est pas compatible, énergétique oui CarbonAgri: Communication et formation des agriculteurs
Diminution des émissions de GES associées aux combustibles fossiles	Réduire combustibles fossiles des engins et l'irrigation	Réduire le nombre de passage des engins agricoles	E	O	GC: Incompatibilité pratiques actuelles (très peu mécanisées) CarbonAgri: Sous équipement des agriculteurs Intérêt des agriculteurs pour les gros tracteurs.
		Réduire la consommation d'énergie des engins	O	O	GC: Selon type de machinerie CarbonAgri: Focaliser la déefiscalisation sur autre chose que l'achat de nouveaux tracteurs.
		Réduire la consommation d'énergie du système d'irrigation	E	N	Irrigation par gravité pour la canne
	Séchage et stockage	Réduire la consommation d'énergie du séchage et/ou de stockage	N	N	La canne n'est pas séchée et l'électricité industrielle produite avec les résidus
Diminution des GES aval	Réduire humidité récolte	Récolte de cultures à plus faible teneur en humidité pour réduire les consommations	N		Incompatibilité avec le procédé
		Réduire les consommations d'électricité du bloc traite (pré-refroidisseur de lait, récupérateur de chaleur, ventilation du bloc traite...)		E	Manque d'appui technique
Stockage de carbone dans le sol	Augmenter la quantité de biomasse restituée		E	N	Incompatibilité pratiques actuelles, impact négatif sur les rendements
	Augmentation des restitutions par les résidus de cultures		O	N	Technicité
	Augmentation des apports de matières amendantes ou fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) sur l'exploitation		O	E	Economique pour transport des effluents
	Insertion et allongement des prairies temporaires et artificielles (luzerne par exemple) dans les rotations		N	N	Incompatibilité avec la culture (rotations de 10 ans)

Situation, déterminants socio-économiques et politiques des usages et pratiques stockantes de carbone des sols agricoles et forestiers des territoires ultramarins

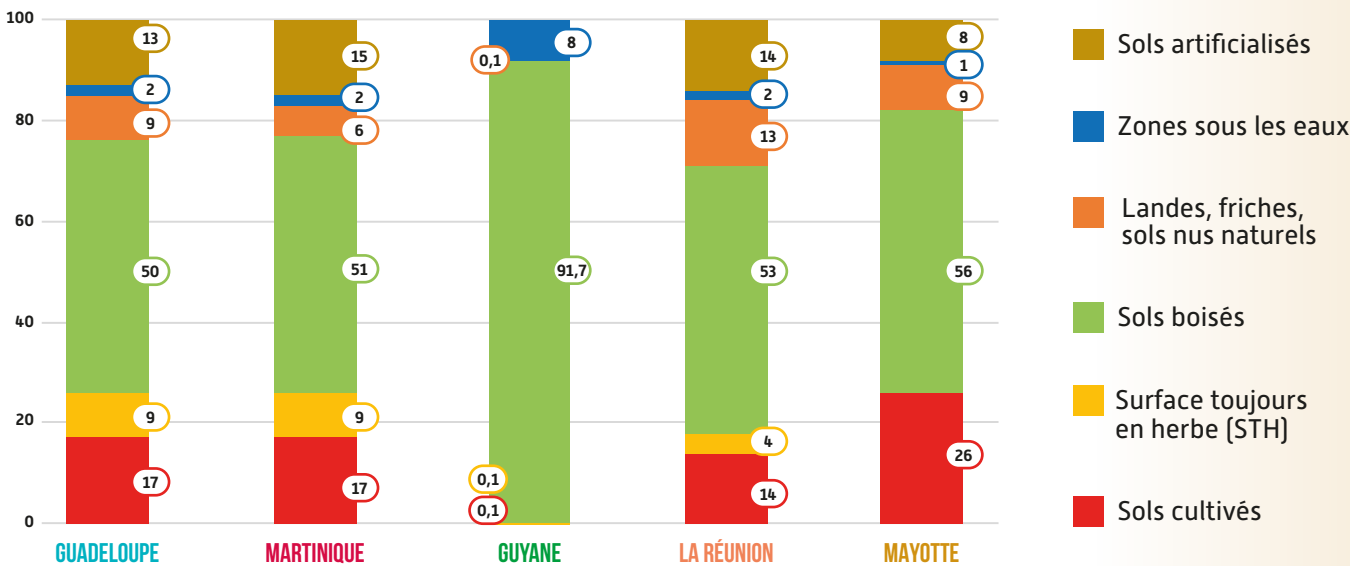


Figure 13 - Occupation du sol dans les départements d’Outre-mer en 2018 sources Agreste - enquêtes Teruti 2017 à 2019

Usages des sols agricoles et forestiers : état des lieux et dynamiques

En termes d’occupation des sols, la **Figure 13** montre clairement deux types de situation : les DROM insulaires d’un côté, et la Guyane de l’autre.

A la Guadeloupe, la Martinique et La Réunion, l’usage du sol est constitué de la manière suivante : pour moitié, l’espace est occupé par de la forêt, les sols artificialisés représentent environ 15 % de la surface et les sols agricoles (cultivés ou toujours en herbe) représentent environ 25 % de la surface. Le reste est occupé par des landes, friches ou sols nus naturels.

En Guyane, 92 % de la surface sont occupés par la forêt, et un peu moins de 8 % par des zones sous les eaux. L’agriculture et les sols artificialisés représentent 1 % du territoire, mais cela est à relier à la surface très grande de ce territoire (83 846 km², ce qui est 46 fois plus grand par exemple que la Guadeloupe). Si l’on combine forêt et agriculture, les surfaces occupées représentent au moins 75% de la surface pour chacun des territoires, ce qui montre clairement l’importance de la question du carbone des sols Outre-mer, puisque ces deux types d’usages représentent un stock de carbone (dans les sols et dans la bio-

masse) pour lequel les activités humaines peuvent avoir une grande influence. **Le Tableau 6** présente un état des lieux des usages des sols agricoles par grand type de spéculation dans quatre des DROM. Quoique de taille différente, la Surface Agricole Utile (SAU) des différents territoires est relativement similaire, se situant entre 22 000 hectares (pour la Martinique) et 38 000 hectares (pour La Réunion). En outre, là aussi, nous constatons que la Guyane présente une situation assez différente des autres territoires puisque les prairies y représentent la moitié de la SAU.

	Guadeloupe		Martinique		Guyane		La Réunion	
Culture	Surf. en ha	%	Surf. en ha	%	Surf. en ha	%	Surf. en ha	%
Canne	1 2415	39%	4 033	18%	471	1%	21 423	55%
Fruits	3 262	10%	6 733	31%	8 142	22%	3 253	8%
Prairies	11 220	35%	7 504	34%	18 263	50%	10 746	28%
Légumes	1 268	4%	1122	5%	499	1%	1 363	4%
Autres	3 632		2 436		8 853		1 963	
SAU	31 797		21 828		36 228		38 748	

Tableau 6 - SAU des différents territoires et usages agricoles des sols. Source : RGA 2020.

En Guadeloupe, à la Martinique et à La Réunion, les prairies ne représentent que 30 à 35% de la SAU. La canne à sucre est majoritaire à la Guadeloupe et à La Réunion.

A la Martinique, les fruits occupent une part particulièrement importante, ce qui est à relier à la culture de la banane pour l'exportation. D'une manière générale, dans les DROM, ce sont la canne et les surfaces en herbe qui sont les usages principaux des sols agricoles.

Nous avons ensuite tenté d'analyser les dynamiques de changement d'usages des sols agricoles dans les différents départements. Les données dont nous disposions (RPG) ne concernaient que les années 2007 à 2014 pour la Martinique, la Guyane et La Réunion et 2012 à 2017 pour la Guadeloupe.

L'état des lieux pour ces périodes montrent qu'à la Guadeloupe l'espace agricole est relativement stable entre 2012 et 2017, avec une baisse de la surface en canne et une augmentation du maraîchage (-300 ha de canne, +300 ha de maraîchage). Nous observons la même dynamique à La Réunion, avec un espace agricole relativement stable, -2 000 ha de canne et +1 000 ha de maraîchage entre 2007 et 2014.

A la Martinique, l'espace agricole est

stable entre 2007 et 2014 avec tout de même une augmentation des surfaces en herbe (+800 ha) et une baisse des surfaces fruitières, cette dernière étant à relier aux difficultés de la filière banane et aux contraintes liées aux terres contaminées à la chlordécone (-600 ha de fruits).

Dans ces trois territoires, la tendance lourde depuis les années 1980 est à la baisse de la SAU, même si cette baisse semble s'être stoppée ou amortie récemment.

La situation est toute autre en Guyane où l'espace agricole a augmenté de 7 000 ha entre 2007 et 2014, l'élevage étant la principale raison de cette augmentation (+3 500 ha de prairie, +1 000 ha de fruits).

La Figure 14 montre les SAU et le nombre d'exploitations agricoles des différents territoires : au total l'agriculture représente 135 000 hectares et plus de 26 000 exploitations agricoles. Cela représente 0,5% de la SAU de la France métropolitaine mais 6% du nombre de ses exploitations agricoles.

La taille moyenne des exploitations agricoles est en effet bien plus petite Outre-mer : environ 5 ha contre 65 ha dans l'Hexagone, ce qui est 13 fois plus petit. Les exploitations d'Outre-mer sont donc très petites en moyenne.

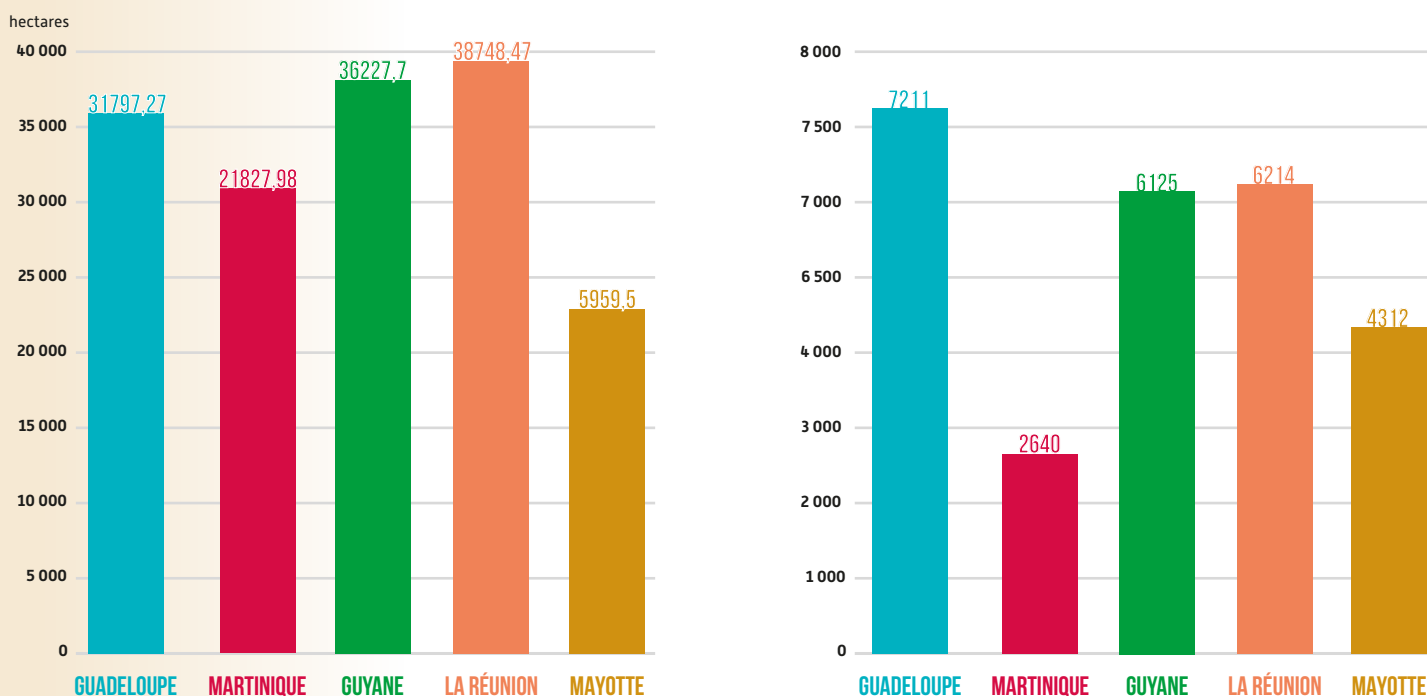
Au plan économique, la Figure 15 montre

que l'agriculture est un secteur économique important Outre-mer : elle représente 40 000 emplois, ce qui est considérable dans des territoires où le taux de chômage est bien plus élevé que la moyenne nationale.

Le chiffre d'affaires de l'agriculture y est de 2 milliards d'euros, dont une partie liée à l'exportation de rhum, de sucre et de fruits tropicaux : banane aux Antilles et mangues, ananas, litchi à La Réunion. Les filières canne, élevage et banane sont les plus grosses pourvoyeuses d'emploi, ainsi que les industries agro-alimentaires. L'agriculture représente donc un secteur essentiel pour ces départements, dont la majeure partie des revenus provient de l'agriculture et du tourisme. Même si elles ont des traits communs, les agricultures d'Outre-mer possèdent chacune leurs spécificités et offrent une grande variété de productions.

Parallèlement, et singulièrement en Guyane, les Outre-mer représentent des territoires où la nature sauvage est unique au monde puisque l'Inventaire national du patrimoine naturel recense ainsi 35 fois plus de plantes terrestres endémiques Outre-mer qu'en métropole. Des mesures sont prises pour la préservation de cette biodiversité. Parmi elles, deux voies à privilégier sont la protection des forêts et le développement de l'agroécologie.

Figure 14 - SAU et nombres d'exploitations agricoles dans les différents territoires étudiés. Source : RGA 2020.

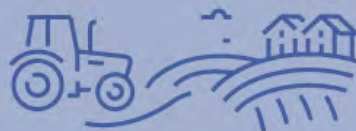


L'agriculture Outre-mer


**Guadeloupe
Martinique**


Guyane


**La Réunion
Mayotte**



26 000
exploitations



40 000
actifs permanents

En 2013



La forêt équatoriale
couvre **92 %** du territoire
de la Guyane

PART DE LA SURFACE
AGRICOLE DANS
LE TERRITOIRE ET NOMBRE
D'EXPLOITATIONS

Guadeloupe.....	19%	7 200
La Réunion.....	15%	6 200
Guyane.....	0,4%	6 100
Mayotte.....	16%	4 300
Martinique.....	19%	2 700

PRINCIPALES PRODUCTIONS AGRICOLES

2,3 
millions de tonnes
de canne à sucre

 **226 100**
tonnes de bananes

AUTRES PRODUCTIONS

En tonnes

 Légumes frais/tubercules	203 531
 Ananas	28 100
 Volailles/lapins	23 189
 Porcins	14 513
 Bovins	5 381



8 200 tonnes
de litchi, longani,
ramboutan



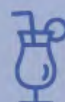
4 700 tonnes
de mangues

L'INDUSTRIE AGROALIMENTAIRE

En 2019



7 700 emplois
dont **50 %** à La Réunion



Les filières de la canne à sucre
(sucre et rhum), des boissons
et de la viande emploient **60 %**
des effectifs salariés

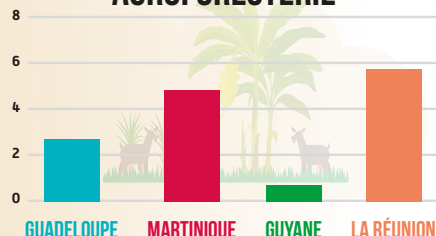


2 milliards d'€
de chiffre d'affaires
dont **7 %** à l'export

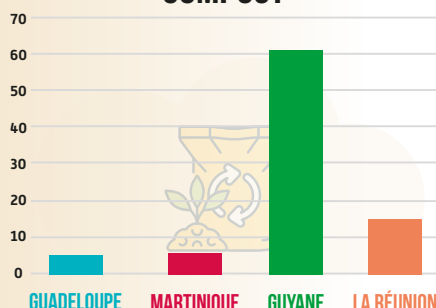
SOURCE : AGRESTE GRAPHAGRI 2021, DONNÉES 2020 SAUF INDICATION CONTRAIRE.

Figure 15 - Principales données économiques sur l'agriculture Outre-mer

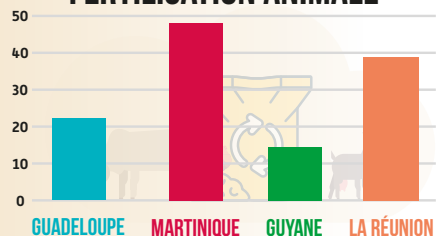
AGROFORESTERIE



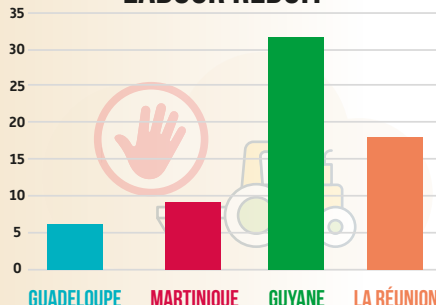
COMPOST



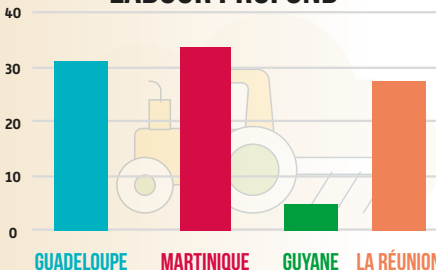
FERTILISATION ANIMALE



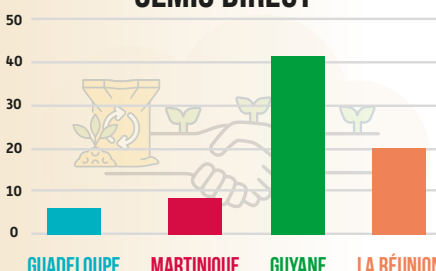
LABOUR REDUIT



LABOUR PROFOND



SEMIS DIRECT



Niveau de mise en œuvre de pratiques agricoles ayant une influence sur les stocks de carbone des sols

La Figure 16 montre les taux d'adoption des 6 pratiques ciblées pour les différents territoires, représentant environ 26 000 exploitations agricoles.

En ce qui concerne l'agroforesterie, le taux d'adoption varie de 0,5 à 6 %. Cette pratique est donc relativement peu développée, en particulier à la Guadeloupe et en Guyane.

L'usage de fertilisants et amendements d'origine organique est en revanche bien plus développé. L'usage d'effluents des systèmes d'élevage est, en particulier, largement répandu à la Martinique et à La Réunion avec des taux d'adoption proches de 40 %. A la Guadeloupe et en Guyane, ils se situent autour de 20 %.

L'usage de compost est moins répandu, en dehors de la Guyane où il concerne près de 60 % des exploitations.

En ce qui concerne le travail du sol, on constate que le labour profond est la pratique la plus répandue, à l'exception de la Guyane où le labour réduit et le semis direct constituent le mode de travail du sol majoritaire.

L'usage du labour profond, pratique ayant une influence négative sur les stocks de carbone, est certainement à relier à la

culture de la canne à sucre. Il conviendrait d'envisager des modes de travail du sol réduits pour cette culture.

D'une manière générale, ces données montrent que la marge de progrès en matière d'adoption de pratiques plus vertueuses pour le carbone du sol est importante. Ces pratiques sont connues mais leur adoption reste partielle. Il conviendra donc de s'interroger sur les déterminants de l'adoption de ces pratiques, en vue d'en amplifier celle-ci.

La Figure 17 montre les niveaux de corrélation entre les 6 pratiques. Il est intéressant de constater que l'utilisation d'une méthode de fertilisation ou de labour exclut les autres. Par exemple, l'usage de fertilisants d'origine animale a tendance à exclure l'usage de compost, et réciproquement : les agriculteurs utilisent l'un ou l'autre de ces deux bio-intrants. L'usage du compost va de pair avec une méthode de labour qui protège les sols (réduction ou absence de labour), ce qui semble témoigner d'une logique globale de conservation des sols et protection de leur santé, traduisant une logique agroécologique favorable au stockage de carbone dans les sols.

Figure 17 - Corrélation entre les pratiques étudiées

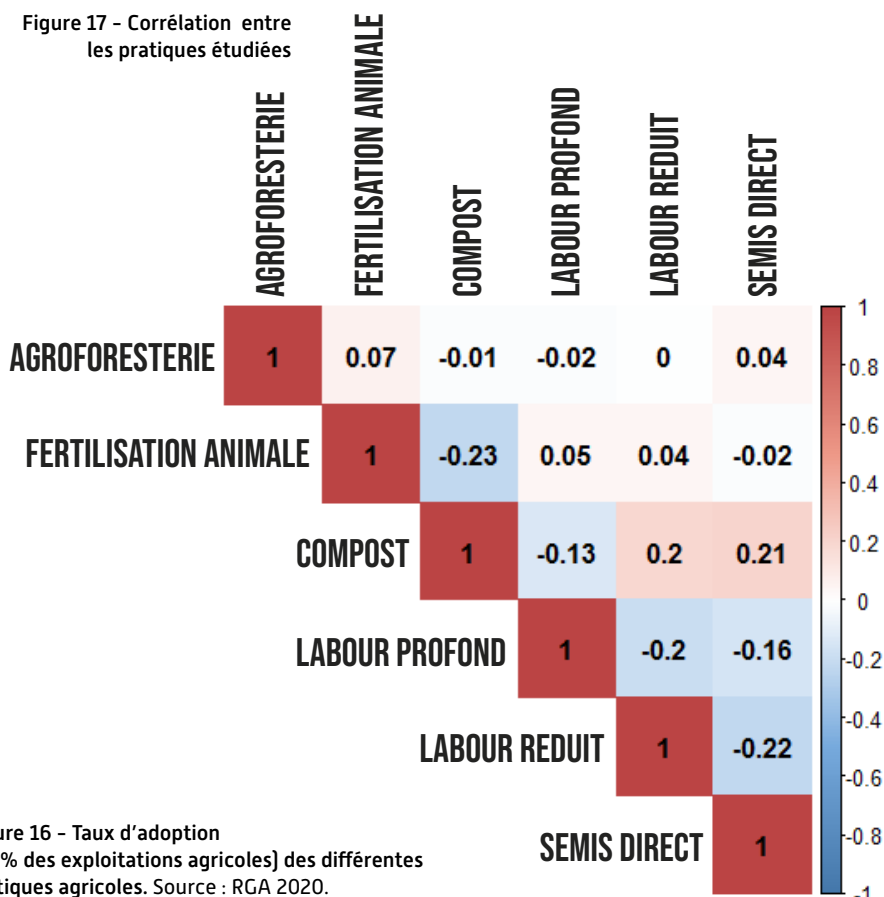


Figure 16 - Taux d'adoption (en % des exploitations agricoles) des différentes pratiques agricoles. Source : RGA 2020.

Déterminants socio-économiques des pratiques agricoles et leviers à actionner pour augmenter leur adoption

Dans cette section, nous présentons les résultats des régressions logistiques permettant d'identifier les variables socio-économiques ayant une influence statistiquement significative, qu'elle soit positive ou négative, sur **les taux d'adoption des 6 pratiques étudiées**. Ces régressions ont été réalisées selon la méthode précisée dans la section « méthodes » de ce rapport et à partir d'une population de 26 000 agriculteurs décrits par 50 variables.

Quatre types de déterminants se dégagent pour l'étude de l'adoption de l'agroforesterie.

Premièrement, l'accès à l'information et la formation semblent déterminants puisque le fait d'être membre d'une asso-

positivement. Ces deux variables entraînent une capacité d'investissement et un filet de sécurité économique.

Enfin, le fait d'être dans une démarche agroécologique est également un déterminant positif pour l'adoption de l'agroforesterie car celle-ci est associée à la mise en œuvre d'autres pratiques agroécologiques (ex : fertilisation organique, semis direct, labellisation en Agriculture Biologique). Nous avons synthétisé dans la Figure 18 les déterminants de l'adoption de l'agroforesterie identifiés dans notre analyse.

Concernant l'adoption du compost, le niveau de formation (impact positif qui s'intensifie avec le nombre d'années d'études), la jeunesse, le fait d'être une

pratique est corrélée à la production brute standard des exploitations. Enfin, cette pratique semble plus particulièrement intéresser des chefs d'exploitation ancrés et investis puisque l'âge et le fait de ne pas envisager un départ de l'activité agricole en favorisent l'adoption.

En ce qui concerne l'adoption de modes de travail du sol réduits (semis direct, travail superficiel et peu fréquent du sol), les déterminants sont relatifs à l'accès au matériel agricole (effet positif d'appartenir à un groupe de partage de matériel), au fait d'avoir une dimension économique moyenne, au niveau de formation agricole de l'exploitant, ainsi qu'à l'ancrage et l'ancienneté dans la production agricole.

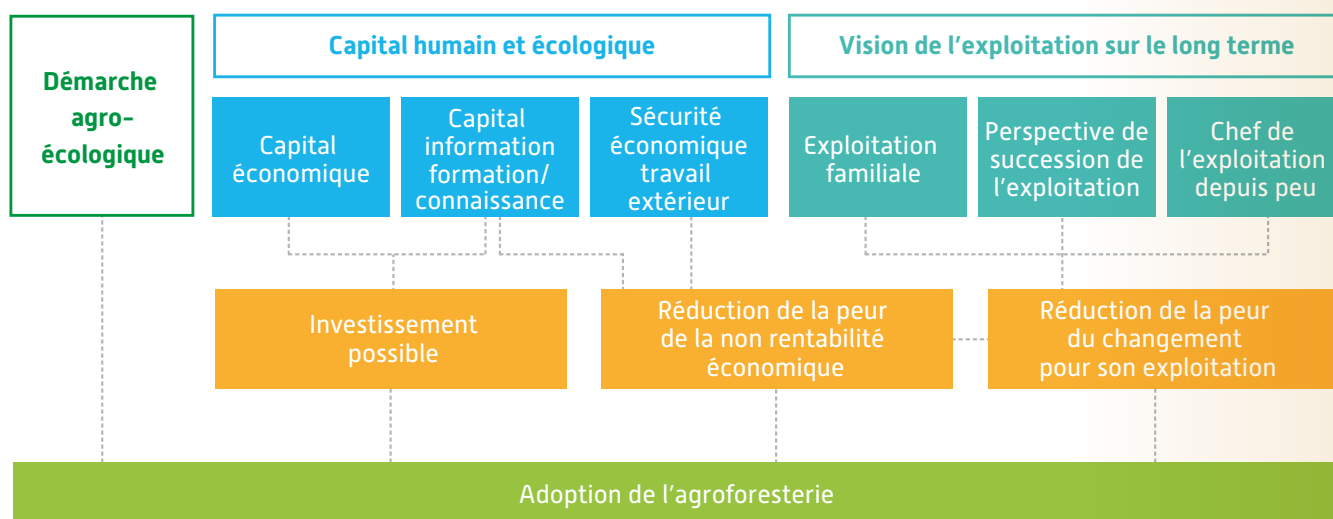


Figure 18 - Synthèse des déterminants de l'adoption de l'agroforesterie

ciation de producteurs et le fait d'avoir une formation agricole ont un rôle positif sur l'adoption.

La vision de l'exploitation dans le futur est également positivement associée à la pratique de l'agroforesterie puisque le fait d'être jeune, ou d'avoir une succession trouvée pour l'exploitation, a une influence positive. Cela est certainement à relier au fait que l'agroforesterie est un investissement sur le long terme.

D'ailleurs, cela est cohérent avec le fait que la sécurité économique des exploitations joue aussi positivement, car le fait d'avoir une dimension économique forte ou un revenu extérieur dans le ménage (profession du conjoint extra-agricole) jouent

positivement, l'usage d'un ensemble de pratiques agroécologiques, la flexibilité vis-à-vis de la main d'œuvre et la capacité de diversification sont des facteurs d'adoption positifs. Cette pratique est également plus adoptée dans les exploitations ayant une plus faible dimension économique.

L'adoption de l'usage de fertilisants d'origine animale est positivement associée à la présence d'animaux sur l'exploitation. Cela montre que l'accès à l'intrant est déterminant et que les échanges entre éleveurs et agriculteurs pourraient être développés pour un usage des effluents en dehors de la ferme, si l'exploitation est en excès d'effluents vis-à-vis des normes d'épandage. La dimension économique est elle aussi un facteur d'adoption positif puisque la pra-

Une hypothèse serait que cette technique réduit la pénibilité du travail. L'adoption du labour profond est, quant à elle, liée à l'orientation productive de la ferme ; en particulier, cette pratique est souvent associée à la culture de la canne et de légumes (Figure 19), à l'inverse de la production de fruits tropicaux et de l'élevage. Cette pratique est aussi associée aux exploitations qui ont une forte dimension économique, un moindre niveau de formation, et au fait d'être un homme. Il s'agit d'une pratique classique et ancrée, contrairement aux pratiques de réduction du travail du sol qui sont plus récentes.

Au vu de ces résultats sur les déterminants de l'adoption, nous pouvons proposer des leviers à actionner pour favoriser l'adop-

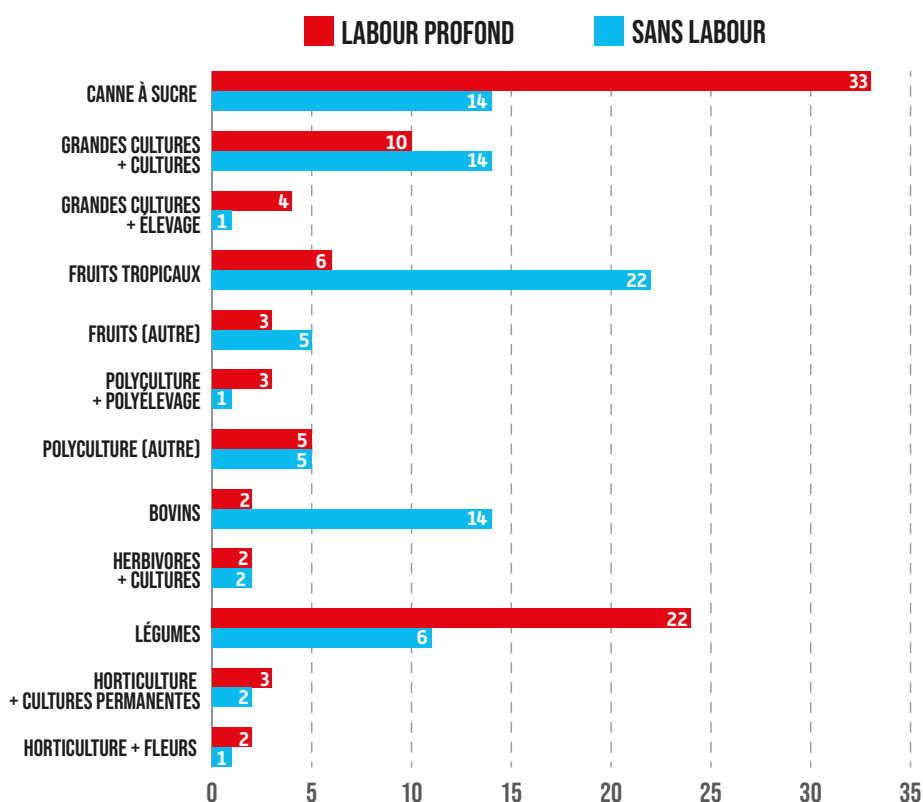
tion de pratiques plus vertueuses vis-à-vis de l'objectif de stockage de carbone dans les sols agricoles.

En ce qui concerne l'utilisation de compost, il s'agirait de : favoriser la diffusion de l'information sur ce type d'amendement ; stimuler la création de groupes de sensibilisation ; mettre en place des formations aux pratiques agroécologiques ; faciliter l'accès à du matériel ou des financements pour le transport et l'épandage ; cibler les plus âgés.

Pour l'usage d'une fertilisation avec des produits d'origine animale, il s'agirait de le renforcer pour les exploitations qui n'ont pas directement accès à l'intrant sur leur parcelle, par exemple en instaurant des plateformes numériques d'échanges de biomasse mettant en relation agriculteurs et éleveurs, ou en accompagnant financièrement l'import d'intrant sur l'exploitation. Un autre levier consisterait à renforcer l'adoption d'animaux sur les exploitations orientées uniquement sur les productions végétales. Finalement, il s'agirait de renforcer l'intégration animal/végétal à l'échelle du territoire ou des exploitations.

Enfin, pour favoriser le semis direct et le labour réduit en substitution du labour profond, il paraît important, en premier lieu, de favoriser l'accès au matériel néces-

Figure 19 - Type de labour en fonction de l'orientation productive de l'exploitation



saire en favorisant les groupes d'entraide ou en subventionnant les petites exploitations dans l'achat du matériel. En deuxième lieu, un levier consisterait en une communication ciblée sur les produc-

teurs de canne et les maraîchers, qui informerait sur les avantages du semis direct, et en des politiques de valorisation de l'agroécologie à travers des incitations économiques.



Expérimentation du mulch en maraîchage à la ferme Karusmart en Guadeloupe (crédit photo : J.-M. Blazy)

LES PAIEMENTS POUR SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Un outil économique qui apparaît particulièrement pertinent pour favoriser le stockage du carbone dans les sols et l'adoption de pratiques agricoles et forestières en ce sens, consiste en la rémunération des services environnementaux associés (le stockage de carbone, la conservation de la biodiversité, le maintien de corridors écologiques, la protection des ressources en eau et des sols, etc.). On parle de paiements pour services écosystémiques (PSE).

Une de leurs finalités est de stimuler les investissements de protection et de production de ces services. Le Conseil Economique pour le Développement Durable [CEDD] a réalisé une note de synthèse sur ce mécanisme intitulée « Les PSE : des rémunérations pour les services environnementaux » [CEDD, 2010]. Nous restituons ici les principales informations sur ce mécanisme innovant de protection des ressources naturelles. Quoique le périmètre des outils considérés comme des « PSE » varie selon les études, la définition la plus communément admise est : « une transaction volontaire, ou un service environnemental, clairement défini, est acheté par un ou plusieurs usagers à un ou plusieurs « fournisseurs », le paiement ayant lieu si et seulement si le fournisseur assure effectivement la provision du service » [CEDD, 2010]. Il s'agit donc d'une approche économique qui vise ainsi à internaliser les services rendus par les écosystèmes dans les choix de décision de leurs gestionnaires en en assurant la rémunération. Les gestionnaires sont volontaires, et peuvent ou non décider de bénéficier des dispositifs de paiement.

Cependant, l'une des parties peut être publique, et la demande peut aussi résulter de réglementations publiques. Plus précisément, les PSE s'inscrivent dans une logique d'incitations, par opposition à la réglementation qui est rigide, et n'encourage pas à aller au-delà de la norme. Ils se distinguent des démarches purement volontaires, sans rémunération explicite, mais aussi d'autres mécanismes de subventions, moins clairement liés à la fourniture vérifiée de services identifiés. Les bénéfices peuvent être de natures diverses : émissions de gaz à effet de serre évitées ; réduction des impacts environnementaux des pesticides ; éléments de paysages ; protection de l'eau et des sols ; corridors écologiques favorables à la biodiversité ; jachères favorables aux pollinisateurs etc. Mais l'identification des services rendus, et leur qualification en termes de valeur, constituent donc le préalable à toute démarche de PSE.

Le fait de privilégier ici la rémunération des efforts plutôt que la taxation des dommages répond souvent à des considérations distributives. Celles-ci ne doivent pas ignorer cependant les mécanismes de capitalisation foncière. Il faut d'abord y voir la reconnaissance qu'il s'agit de rémunérer des activités

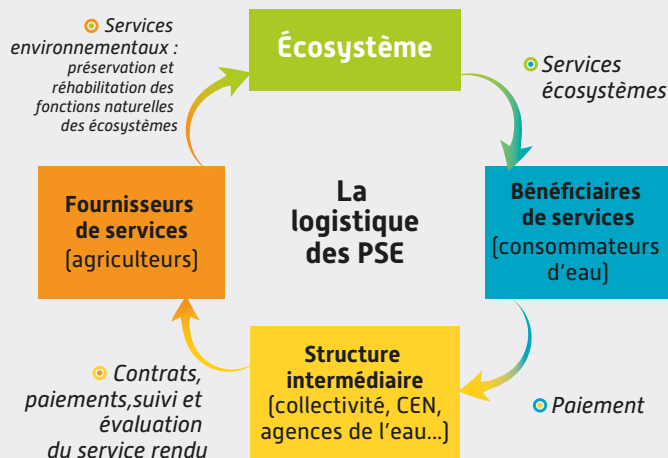
économiques, mobilisant l'intelligence et le savoir-faire entrepreneurial, et présentant les traits caractéristiques économiques des activités de « service » : importance de la qualité, sensibilité à différents aléas nécessitant de trouver les bons arrangements pour gérer et partager les risques, localisation dans le temps et dans l'espace du produit. Le fait d'introduire ainsi une approche économique dans des domaines qui, en apparence, en semblent éloignés, ne saurait surprendre. En effet, les pressions sur les écosystèmes résultent bien de mécanismes économiques (surexploitation de ressources communes en libre accès, et changements d'affectation des terres induits par les différentiels de rémunération selon leur usage). Par ailleurs, on constate que beaucoup de politiques de conservation « pures » s'avèrent décevantes, soit parce qu'elles génèrent des comportements de contournement, pourtant prévisibles économiquement, soit parce que leur efficacité nécessite une approche d'ensemble identifiant tôt les actions de gestion à mettre en place. Le développement des PSE vise ainsi à rétablir des incitations économiques en ligne avec une gestion soutenable de ces espaces, valorisant les services environnementaux qu'ils fournissent.

Les systèmes de PSE ont plusieurs sources de financement potentielles, qui combinent parfois l'action publique et l'initiative privée : paiement par les usagers du service

écosystémique (cas de Vittel ou des agences de l'eau) ; paiement par la puissance publique (cas des mesures agro-environnementales) ; paiement par des opérateurs tenus de compenser leurs impacts. Ces différents schémas illustrent la nécessité d'optimiser les politiques de protection de la nature en termes de partage public-privé. Selon le CEDD (2010), les facteurs clés du succès des démarches de mise en place de PSE sont les suivantes :

écosystémique (cas de Vittel ou des agences de l'eau) ; paiement par la puissance publique (cas des mesures agro-environnementales) ; paiement par des opérateurs tenus de compenser leurs impacts. Ces différents schémas illustrent la nécessité d'optimiser les politiques de protection de la nature en termes de partage public-privé. Selon le CEDD (2010), les facteurs clés du succès des démarches de mise en place de PSE sont les suivantes :

- **Adapter** le PSE au contexte institutionnel et foncier
- **Etablir** un niveau de référence et assurer l'additionnalité du projet
- **Identifier** les sites prioritaires et différencier les niveaux de paiements
- **Inform**er et **sécuriser** les bénéficiaires potentiels
- **Garantir** la pérennité
- **Minimiser** les coûts de transaction et d'administration
- **Evaluer** la conformité des pratiques et limiter les fuites



Mise à l'agenda politique européen et national du stockage du carbone

Au niveau politique, le tournant européen en matière climatique est matérialisé par de nouveaux objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050, portés par le Pacte Vert pour l'Europe et une nouvelle Politique Agricole Commune en synergie avec les attentes du Green Deal. Il place le stockage du carbone au-devant de l'agenda politique européen.

Lors de la COP 21, de nombreux chercheurs émettent déjà l'hypothèse qu'atteindre les objectifs fixés, à savoir limiter le réchauffement climatique à un niveau bien inférieur à 2 degrés Celsius (de préférence à 1,5 degré), par rapport au niveau préindustriel, ne sera possible qu'en exploitant de façon adéquate les capacités des sols et des océans à séquestrer du carbone.

Ainsi en témoigne la communication de la Commission européenne intitulée « Des cycles du carbone durable » de la Stratégie « De la Ferme à la Table » du Pacte Vert, et la mise en place de cycles de conférences réunissant les décideurs politiques à l'échelle européenne sur l'élaboration d'une législation européenne prévue pour 2023, notamment à des fins de valorisation des pratiques agricoles et sylvicoles.

A l'échelle nationale, l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 est porté par la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC 2) qui s'appuie sur le potentiel de stockage de carbone des sols français.

Cependant, un chiffrage du potentiel permis par ce levier demeure indispensable. Les différentes techniques et technologies concernant la séquestration du carbone, qui se sont multipliées dans le sillage de la COP 21, reposent en effet largement sur des principes théoriques plus que sur des technologies fiables et certifiées. La diffusion de ces approches théoriques a des conséquences concrètes sur les orientations sociales et politiques, lesquelles placent beaucoup d'espoir en ces nouvelles perspectives à travers des programmes de recherche, des agendas de développement, des organisations et plusieurs autres activités fondées sur ces principes. Mais ce phénomène spéculatif autour du stockage du carbone génère également de nombreuses critiques. Elles ont notamment été émises dans le cadre de l'évaluation de la SNBC 2 et des lois successives telles que la loi Climat & Résilience, par les diverses études d'impact environnemental portées par le CNTE, le CESE, le Haut Conseil pour le Climat ou encore la CCC.

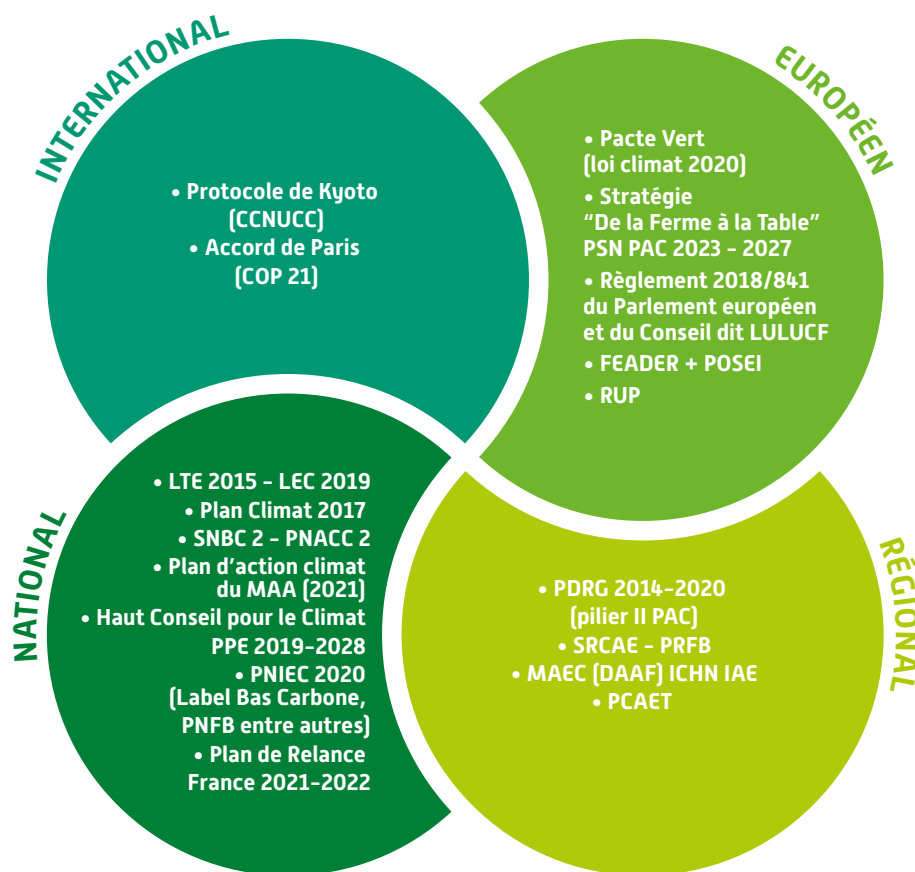


Figure 20 - L'architecture des politiques publiques européennes et nationales d'atténuation du changement climatique et de stockage de carbone

Une deuxième série de critiques sont adressées à l'Initiative « 4 pour 1 000 » dans la mesure où la dualité des sols, qui peuvent à la fois stocker et déstocker du carbone, est souvent occultée. Les sols sont ainsi appréhendés politiquement comme disposés à stocker du carbone de façon immédiate dans un contexte où depuis l'industrialisation de l'agriculture, et de façon générale la fin du 19^{ème} siècle, les politiques et pratiques agricoles ont grandement contribué à appauvrir et dégrader les sols. Il s'agit donc avant tout d'accompagner un changement de ces pratiques afin de s'assurer, avant qu'elles favorisent le stockage du carbone, qu'elles n'en déstockent plus.

Enfin, une troisième série de critiques reposent sur la dimension temporelle et quantitative du stockage de carbone dans les sols. La quantité de carbone stockée dans les sols augmente sur une durée limitée dans le temps, au-delà de laquelle elle atteint un équilibre. L'enjeu n'est donc pas seulement d'arrêter de déstocker et de stocker du carbone, mais également de le maintenir dans le temps. Ainsi, c'est à ce chiffrage et à l'identification, de façon

concrète, de pratiques agricoles et forestières permettant d'augmenter et de maintenir la teneur en carbone organique des sols, que s'est attelée l'Étude 4 pour 1000 menée en France métropolitaine. Cependant, et c'est dans ce cadre que s'inscrivait la présente étude, les résultats de l'étude métropolitaine ne sont pas transposables à l'échelle des territoires ultramarins du fait de la spécificité des conditions pédoclimatiques tropicales.

Cela se vérifie d'autant plus que certaines initiatives de promotion, de valorisation et de rétribution de ces pratiques, opérationnelles via le Label bas carbone, ne sont pas encore adaptées aux territoires ultramarins. La présente étude est donc largement exploratoire sur ce sujet. Au niveau régional, ces politiques sont déclinées à travers les Programmes de Développement Rural, le Programme Régional de la Forêt et du Bois, le Schéma d'Aménagement Régional, le Schéma Régional Climat Air Énergie ainsi que la Commission Départementale de Protection des Espaces Naturels Agricoles et Forestiers qui permet de contrôler l'artificialisation des sols.

Conclusions, recommandations d'actions et perspectives du volet socio-économique et politique

Nous synthétisons ici les principales conclusions et recommandations d'actions issues de cette étude en sciences sociales, économiques et politiques.



CONCLUSION

Concernant les changements d'usage des sols, il convient de **veiller à la conservation des principaux stocks de carbone**, en particulier ceux des forêts, notamment en Guyane, car la forêt est un stock de carbone important qui se dégrade fortement lors d'une conversion d'usage. **La conservation des terres agricoles** vis-à-vis des risques d'artificialisation (urbanisation) est, elle aussi, un enjeu crucial, en particulier dans les territoires insulaires. Le développement des cultures maraîchères au détriment des grandes cultures comme la canne à sucre ou des espaces enherbés pour l'élevage, peut également aboutir à un déstockage important. Dans la perspective d'une plus grande autonomie alimentaire des territoires ultramarins, il faudra donc veiller à maintenir les stocks de carbone du sol à travers des pratiques vertueuses telles que le non labour, l'usage d'amendements organiques, ou en développant l'agroforesterie (relativement peu développée actuellement).

Les taux d'adoption de ces pratiques comportent une marge de progrès importante. Notre étude a montré que les variables les plus déterminantes sont relatives à la dimension économique de l'exploitation, son type (culture versus élevage), le type et le niveau de formation, la disponibilité en main d'œuvre et son type (familiale, salariée, saisonnière), tout comme le fait d'avoir un revenu extérieur à l'exploitation au sein du foyer.

Autres déterminants importants sont **l'intégration à des réseaux** (ex : organisation de producteurs, CUMA) et **une sensibilité agroécologique** (labellisation Agriculture Biologique, insertion dans des circuits courts) qui sont favorables à la mise en œuvre des pratiques vertueuses vis-à-vis du carbone du sol. Parfois les contraintes topographiques et physiques limitent l'adoption des pratiques (Guadeloupe et Guyane). Certaines pratiquent fonctionnent en lien avec d'autres (ex : usage de

compost et labour réduit), certaines sont antagonistes (ex : avec le labour profond). Il y a une cohérence fonctionnelle (système de culture) et stratégique (objectifs de l'agriculteur) à leur adoption. L'appartenance à un type d'exploitation en termes d'orientation productive (ex : canne, banane, maraîchage, fruits) est souvent prépondérante dans l'adoption ou non des pratiques.

Il conviendra donc de cibler les actions incitatives par type d'exploitation. Au-delà des variables observées, il peut y avoir un fort déterminisme individuel (motivation, attitudes, connaissances) à l'adoption de pratiques agroécologiques.

Enfin, les pratiques étudiées demandent d'investir, parfois dans le long terme (agroforesterie, équipement de semis direct ou d'épandage d'amendements organiques).



RECOMMANDATIONS

Au vu de ces conclusions, nous formulons les recommandations d'actions suivantes. La question du stockage de carbone renvoyant beaucoup à celle de la transition agroécologique, faciliter cette transition pourrait se faire comme suit :

- **développer le « nudging »** (de l'anglais nudge : coup de pouce) et des actions de communication positives sur les pratiques agroécologiques ;
- **faciliter l'accès aux investissements, formations et CUMA** pour les besoins en matériel spécifique et amortir les risques économiques liés à la transition ;
- **rémunérer les services écosystémiques** associés à des pratiques vertueuses pour la nature mais souvent plus coûteuses, dans un contexte où les petites exploitations (< 10 ha) sont très majoritaires ; cibler les types d'exploitation pour les actions (ex : canne à sucre et labour réduit) ;
- **favoriser l'intégration animal/végétal** à l'échelle des exploitations mais aussi du territoire ;
- **développer l'agroforesterie**, surtout en Guyane.

S'il existe de fortes similarités sur la question de l'adoption des pratiques favorables au stockage de carbone entre

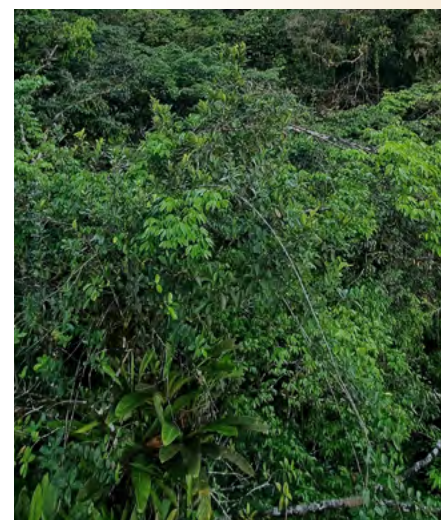
les différents territoires ultramarins, il n'en reste pas moins que chaque territoire a ses spécificités.

Les situations de la Guadeloupe et la Martinique sont relativement semblables, la situation de La Réunion étant proche mais souvent plus « en avance » en matière de transition.

Le cas de la Guyane est très particulier : l'enjeu de conservation de la forêt y est très important, l'agriculture y est en expansion, et les pratiques adoptées diffèrent de celles des autres territoires. Ce territoire présente un enjeu fort de développement agricole durable dans un contexte de croissance démographique, économique et de pression sur la forêt.

Enfin, il convient de préciser que si cette étude en sciences économiques, sociales et politiques a permis de dresser un premier tableau sur la question de l'adoption des pratiques ayant une influence sur les stocks de carbone du sol, elle est largement exploratoire et elle devra être complétée d'autres recherches pour aller plus loin.

Les perspectives scientifiques sont d'obtenir une meilleure description des pratiques stockantes et de leurs déterminants par des enquêtes de terrain spécifiquement conçues, de mieux cibler les questions d'attitude et d'innovation sociale, d'établir des scénarios de transition territoriale optimisés sur le stockage de carbone permettant d'identifier des modalités d'adaptation des politiques publiques, et enfin, de travailler sur les conditions de mise en place de mécanismes de rémunération des services écosystémiques de stockage du carbone et de maintien de la biodiversité.



Forêt de Guyane (crédit photo : L. Jacob)

DE LA FABRIQUE DES POLITIQUES À LEUR MISE EN ŒUVRE SUR LES TERRITOIRES : CAS DE LA GUADELOUPE

Dans le cadre de l'étude en sciences politiques, une analyse de la fabrication et de la mise en œuvre des politiques publiques de stockage de carbone dans les sols agricoles et forestiers a été réalisée à la Guadeloupe. Nous en présentons ici les principaux enseignements.

Cette étude a permis de :

- Décrire l'organisation des filières agricoles, les défis hétérogènes auxquels elles font face,
- Analyser la mise à l'agenda et les jeux d'acteurs du secteur agricole local à l'œuvre autour de la thématique « stockage du carbone dans les sols », en étudiant les dynamiques de construction d'une réalité « climatique » de certaines pratiques agricoles ainsi que les acteurs qui s'emparent ou ne s'emparent pas de cette « problématique » encore très technique,
- Etudier l'instrumentation de l'atténuation du changement climatique dans le secteur agricole guadeloupéen à travers la mise en œuvre des mesures labellisées « stockage du carbone dans les sols » au sein du Programme de Développement Rural de la Guadeloupe 2014-2020 (PDRC 14-20).

De façon renouvelée depuis la crise sanitaire du Covid-19, l'autonomie alimentaire des DROM est au cœur de l'agenda politique local des Outre-mer et des discussions à l'échelle européenne (ODEADOM), nationale (Etats généraux de l'Alimentation, Assises de l'Outre-mer, discours d'Emmanuel Macron en 2019 à La Réunion) et locale (développement de projets alimentaires territoriaux, discours des élus engagés pour l'autonomie alimentaire du territoire). D'après le volet biophysique de la présente étude, les cultures a priori les plus stockantes, ou génératrices de stockage de carbone dans les sols, sont les monocultures de banane et de canne à sucre, tandis que les pratiques de diversification seraient moins propices dans leurs conditions actuelles de mise en œuvre. Il y a donc là une tension entre deux enjeux importants de développement durable qui nécessitera des arbitrages ou des compromis.

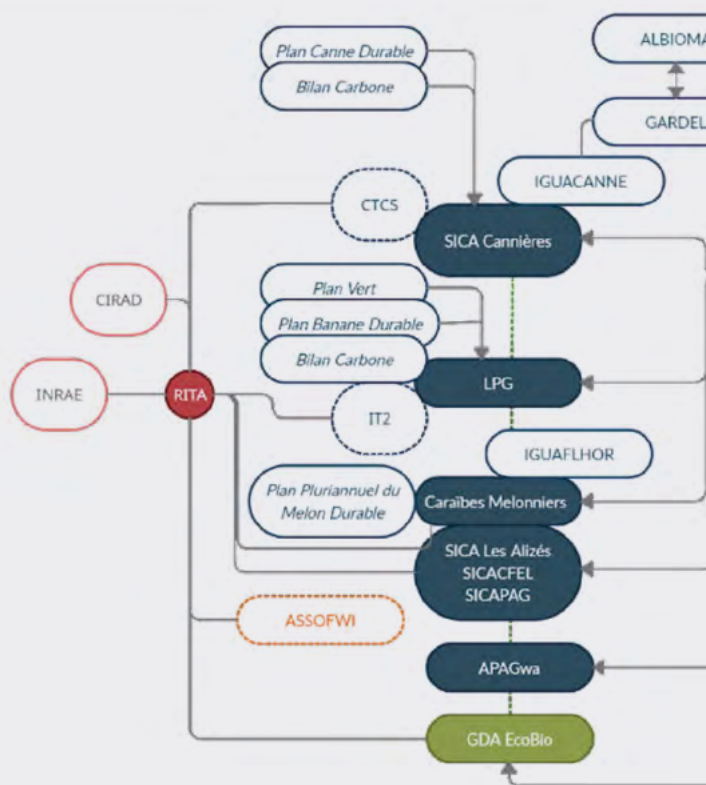
Une mise à l'agenda politique « silencieuse » du stockage de carbone dans les sols

Le premier résultat de l'étude en sciences politiques est que la mise à l'agenda politique local est « discrète » et portée par une « communauté épistémique ». Au niveau national et international, la mise à l'agenda du stockage du carbone comme politique publique d'atténuation du changement climatique, matérialisée par l'Initiative « 4 pour 1000 », pourrait avoir souffert d'avoir démarré avant que la phase scientifique ne soit pleinement mature. En revanche, les entretiens menés lors de cette étude à la Guadeloupe ont permis de mettre en évidence que le terme de « stockage du carbone dans les sols », associé à des pratiques agricoles, est encore fortement technicisé et s'inscrit clairement dans le registre de l'anticipation. Ainsi, nous pourrions considérer que la mise à l'agenda du « stockage du carbone dans les sols » à la Guadeloupe est « silencieuse ».

Définie par Philippe Garraud, la mise à l'agenda « silencieuse » ou « discrète » est présentée comme un modèle dans lequel la controverse publique est quasiment inexistante, la médiatisation infime, les actions visibles très limitées. Surtout, le modèle se caractérise par un rôle moteur des autorités publiques, des structures d'expertise auprès des ministères et/ou des groupes organisés bénéficiant d'un accès privilégié aux autorités publiques. Ainsi, les modalités de mise à l'agenda se jouent dans des « espaces discrets » difficiles à analyser, en huis clos, ce qui est souvent recherché par les acteurs concernés. Dans tous les cas, l'initiative gouvernementale reste décisive et permet de rendre visible le problème comme tel. Ainsi, dans les Outre-mer, ce sont une trentaine de chercheurs agronomes et pédologues essentiellement issus des instituts de recherche nationaux IRD, INRAE et Cirad qui se penchent sur la question du stockage de carbone organique dans les sols agricoles et forestiers, et participent à le faire émerger comme une problématique en lien avec l'atténuation du changement climatique. Ainsi, à l'heure actuelle, c'est une « communauté épistémique » qui s'articule surtout autour de la thématique « stockage du carbone dans les sols » à la Guadeloupe. En sociologie de l'action publique, une communauté épistémique est un groupe informel restreint qui repose sur des croyances partagées en lien avec des savoirs scientifiques et techniques communs à des acteurs dotés de ressources d'expertise. La « communauté épistémique » joue alors souvent un rôle dans la formulation des politiques, participe à construire les problèmes, mais est moins impliquée quant aux processus décisionnels qui en découlent et à leur mise en œuvre.

Des pratiques agricoles de stockage de carbone dans les sols à travers le concept de « transition agroécologique »

Les entretiens conduits auprès des acteurs questionnés plus directement sur la mise en œuvre de pratiques, de projets ou



de recherches orientées dans le but de stocker du carbone dans les sols donnent à voir que le « stockage du carbone dans les sols » n'est pas une priorité des acteurs du secteur agricole guadeloupéen, et que cette thématique reste majoritairement maîtrisée par la « communauté épistémique ». En outre, les pratiques agricoles auquel le stockage de carbone dans les sols se réfère (amendement organique, pâturages sur prairies permanentes, jachère, enherbement, faible labour, haies, agroforesterie) lorsqu'elles sont mises en œuvre, sont elles-mêmes appréhendées par la quasi-totalité des différents acteurs interrogés sous un angle essentiellement sanitaire, économique, de conservation de la biodiversité et d'adaptation au changement climatique.

Au fil des entretiens (DAAF, SICAs, Interprofessions, OP, PNG), les acteurs adoptent un fort cadrage de l'ensemble des pratiques agricoles autres que des pratiques agricoles conventionnelles et biologiques à travers le concept de « transition agroécologique ». La transition agroécologique est définie comme le changement du modèle agricole dans le but de répondre à la crise traversée par ce secteur. D'après le diction-

naire de l'agroécologie, cette transition repose sur plusieurs « principes agroécologiques », à savoir « la création et mobilisation de savoirs issus de l'agroécologie, l'engagement des acteurs (agriculteurs, conseillers agricoles...) dans la construction de ces savoirs pour une adaptation aux territoires, et la territorialisation de l'agriculture impliquant notamment une reconnexion de la production agricole avec l'alimentation locale ». Il faut cependant être prudent avec l'usage de ce concept car il ne fait pas l'objet d'une définition stabilisée à la Guadeloupe. Il est donc utilisé le plus souvent par les acteurs pour évoquer l'ensemble des changements des pratiques actuelles vers des pratiques plus vertueuses vis-à-vis de la biodiversité (sans ou avec moins de pesticides, d'herbicides, d'engrais minéraux et de produits phytosanitaires), de l'usage des ressources naturelles (eau en priorité, puis sols) et permettant une meilleure adaptation aux impacts du changement climatique (sécheresse surtout). Les acteurs interrogés insistent fortement également sur la dimension économique de rentabilité pour l'ensemble des agriculteurs qui doit nécessairement accompagner l'adoption de ces nouvelles pratiques. En outre,

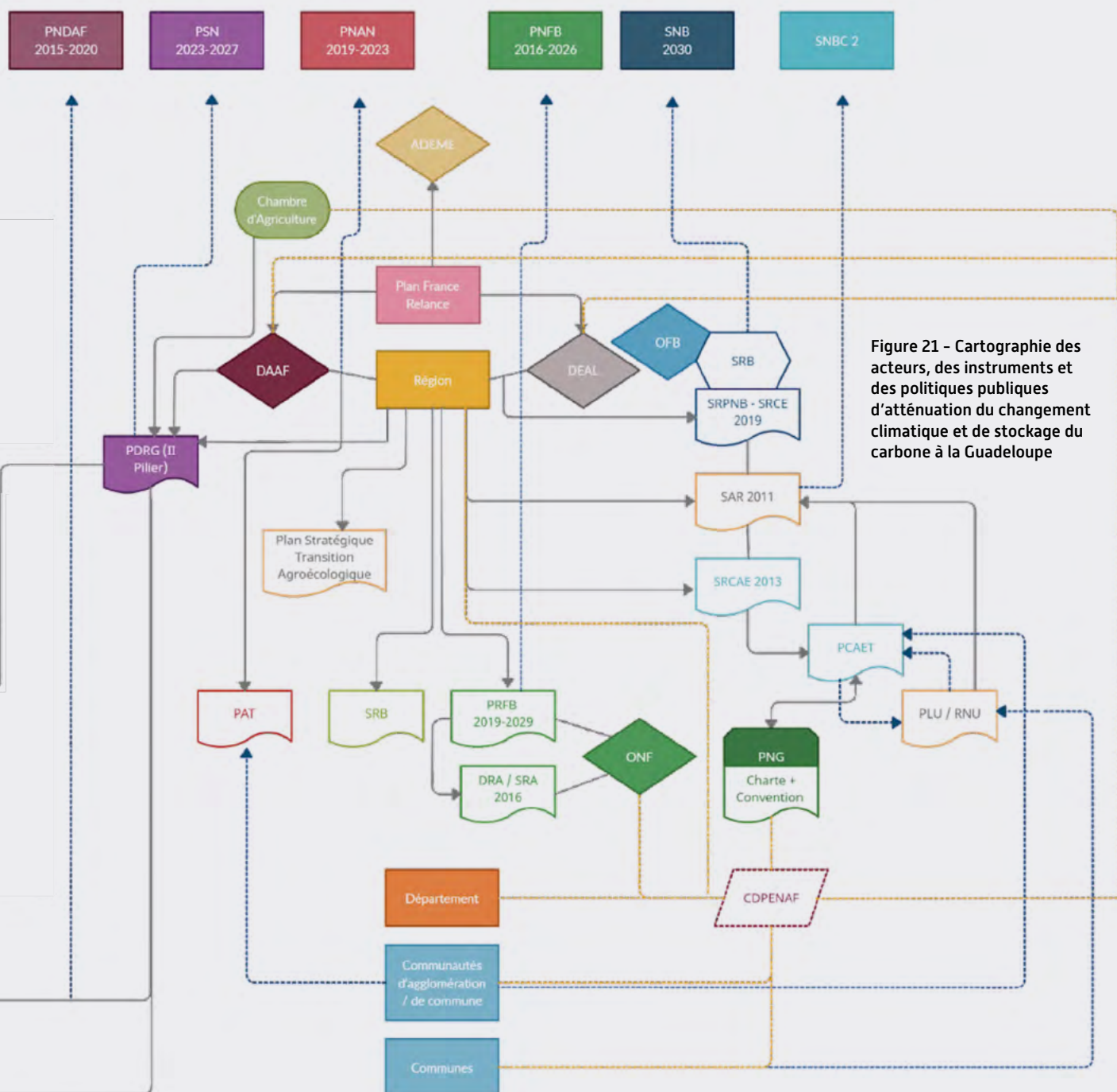


Figure 21 - Cartographie des acteurs, des instruments et des politiques publiques d'atténuation du changement climatique et de stockage du carbone à la Guadeloupe

L'Initiative « 4 pour 1000 » elle-même, bien qu'elle déclare vouloir fédérer l'agroécologie et l'agriculture de conservation par les pratiques qu'elle promeut, ne prend pas position sur un type d'agriculture en particulier. Elle encourage plutôt tout type d'agriculture favorisant une dynamique 4 pour 1000. Cette absence de prise de position également critiquée renforce les activités de transcodages – d'interprétation – à l'œuvre par les acteurs du territoire.

Les experts et les scientifiques ne sont pas seuls à se mobiliser sur la thématique « stockage du carbone dans les sols ». En effet, des groupes d'intérêt organisés se saisissent également de cette question : la filière canne à sucre, la filière banane notamment, ainsi que des établissements publics de l'Etat, en premier lieu l'ONF, chargé de la mise en œuvre du régime forestier, qui s'intéresse à la mise en œuvre du Label bas-carbone à la Guadeloupe, puis des agences comme l'ADEME, dans une moindre mesure, avec d'autres approches du stockage du carbone sur le territoire guadeloupéen.

La cartographie des acteurs en Guadeloupe

La cartographie des acteurs, des instruments et des politiques publiques d'atténuation du changement climatique et de stockage du carbone à la Guadeloupe (Figure 20) montre l'existence d'une multitude d'outils politiques de programmation et d'acteurs concernés, au carrefour d'enjeux agricoles, climatiques, économiques (biomasse) et de biodiversité.

La mise en œuvre du PDRG 14-20, analysée au prisme du stockage du carbone, montre que c'est le deuxième pilier de la PAC qui est mobilisé. Le PDRG 14-20 est un programme stratégique qui permet de répondre aux priorités de l'Union européenne en matière de développement rural. Il organise la répartition des crédits européens sous la gestion de la Région Guadeloupe. Ce programme n'identifie pas un besoin ou une priorité clairement identifiée « stockage du carbone dans les sols ». En revanche, certaines mesures sont décrites comme le favorisant, ce que nous appellerons des mesures labellisées « stockage du carbone dans les sols ». Dans les MAEC 14-20, on constate qu'une priorité a été donnée aux enjeux de conservation de la biodiversité et de gestion des ressources naturelles.

Les filières structurées mieux armées pour disposer d'aides au stockage de carbone dans les sols

La conclusion de l'enquête de terrain a été la suivante. Les filières structurées (cultures de banane, de canne à sucre mais aussi de maraîchage en fonction des organisations de producteurs) captent plus facilement les aides labellisées « stockage du carbone dans les sols », c'est-à-dire identifiées comme le favorisant dans le PDRG, afin de changer et maintenir leurs pratiques et donc maintenir ou accroître leur potentiel de stockage. Elles ne le font pas à dessein, mais pour répondre à d'autres priorités agricoles qui se superposent : des enjeux sanitaires, économiques, environnementaux et d'adaptation au changement climatique. Ces filières disposent de ressources politiques, techniques, financières et organisationnelles qui leur permettent de se saisir, de mettre en œuvre et d'influencer favorablement ces aides. Ces aides sont pour elles des opportunités financières et engendrent des effets d'aubaine qui leur permettent de perpétuer leurs pratiques en limitant les coûts d'adoption ou d'apprentissage. Ainsi, les filières structurées peuvent également maintenir la balance de pouvoir préexistante en leur faveur.

Les filières les moins structurées (cultures de diversification) captent plus difficilement les aides labellisées « stockage du

carbone dans les sols » dans le PDRG. Ce sont pourtant ces filières qui nécessitent le plus de changer leurs pratiques afin de mettre fin au déstockage du carbone qu'elles génèrent par des pratiques fondées sur le court terme et l'intensification des terres. Elles nécessitent également ces aides tout simplement pour se développer et se structurer, ce qui aurait des conséquences favorables en termes de maintien des stocks. Elles disposent de moins de ressources politiques, techniques, financières et organisationnelles, et se saisissent des mesures du deuxième pilier de la PAC implique pour les agriculteurs un véritable « travail bureaucratique » supplémentaire. Cette surcharge administrative est d'autant plus lourde que les mesures du PDRG souffrent d'une déconnexion avec les contraintes que ces filières rencontrent sur le terrain. Ces dernières sont également plus vulnérables aux enjeux du territoire : pression foncière, concurrence régionale, aléas climatiques.

Il faut cependant nuancer car il ne s'agit pas d'une opposition stricte des deux logiques de filière. La filière banane et la filière canne favorisent le stockage du carbone dans les sols agricoles sous réserve qu'elles perpétuent les pratiques qui le permettent (ex : couvert quasi permanent, travail du sol peu fréquent). Il convient de souligner que l'ensemble des agriculteurs en banane et en canne n'adoptent pas de façon unanime ces pratiques. La filière de diversification compte beaucoup d'agriculteurs aux profils et aux sensibilités différentes, au sein et en dehors des organisations des producteurs (OP). Les OP elles-mêmes disposent de plus ou moins de ressources leur permettant de saisir plus facilement ou non les aides. Au sein de la filière de diversification, il y a donc également des acteurs qui, parfois de façon marginale, expérimentent et mettent en place des pratiques alternatives favorisant le stockage du carbone comme, par exemple, les agriculteurs regroupés au sein du GDA (Groupement de Développement Agricole) EcoBio, les membres de l'ASSOFWI ou les agroforestiers. Il conviendrait, à ce stade, d'approfondir la recherche en ce qui concerne la présence de ces acteurs sur le territoire guadeloupéen, les ressources dont ils disposent, la façon dont ils se saisissent et interprètent les instruments d'action publique dont les aides du deuxième pilier de la PAC.

Enfin, il est à noter que les instruments existants sont parfois déconnectés de la réalité du terrain et des défis des filières ultramarines, avec un foncier exigu, un manque de solutions et d'accompagnement techniques, des subventions peu flexibles et peu adaptées aux petites exploitations qui sont largement majoritaires dans ces territoires. Les instruments semblent taillés par ceux et pour ceux qui s'en saisissent, ils sont vus comme une opportunité de financement. Afin de développer des pratiques vertueuses vis-à-vis du stockage de carbone dans les sols, nous formulons quelques recommandations :

- Développer des méthodes permettant de quantifier les capacités de stockage de carbone des sols agricoles pour une plus fine appréciation du potentiel et de l'intérêt économique, pour pouvoir mobiliser des paiements pour services environnementaux basés sur les résultats ;
- Renforcer le dialogue et la communication intra et inter filières pour améliorer les interdépendances bénéfiques en matière de stockage du carbone (ex : rotations de cultures, flux de matières organiques) ;
- Investir dans la recherche pour compenser les manques d'alternatives, pallier le manque de données et mieux connaître et accompagner toutes les exploitations dans la mise en œuvre de pratiques plus durables ;
- Lutter contre la spéculation et la rétention de foncier agricole pour mettre fin à l'intensification des parcelles.



Principales recommandations et perspectives de l'étude

Cette étude permet, pour la première fois dans les territoires ultramarins, de dresser un bilan de l'état des connaissances sur le carbone du sol, en portant un regard transversal et pluridisciplinaire.

Constats

Deux enseignements majeurs se dégagent :

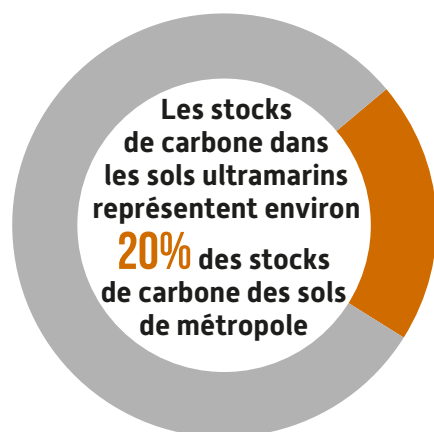
① Les stocks de carbone dans les sols ultramarins représentent environ 20 % des stocks de carbone des sols de métropole.

En fonction de l'usage des sols, les stocks de carbone du sol par hectare peuvent atteindre, Outre-mer, des valeurs 2 à 3 fois plus élevées qu'en métropole. Pour appréhender le poids de ces territoires dans le bilan carbone de la France, les stocks de carbone dans la biomasse aérienne doivent être considérés. En Guyane, ces stocks représentent 120 % du carbone de la biomasse aérienne des forêts métropolitaines, tandis que la superficie de la forêt guyanaise représente 46 % de la superficie forestière de métropole. Or, au vu des tendances d'évolution d'occupation des territoires et de la diversification des cultures agricoles, les stocks de carbone des sols et de la biomasse aérienne de ces territoires tendent à baisser. Etant donné les nombreux services écosystémiques fournis par le carbone dans le sol (ex : régulation du climat, biodiversité, fertilité des sols, rétention d'eau, limitation de l'érosion), mais aussi dans

la biomasse aérienne, la recommandation générale que nous formulons est de préserver les stocks élevés de carbone du sol existants et de limiter leur diminution.

② Les informations sont encore parcellaires et à conforter en Guadeloupe, en Martinique, en Guyane et à La Réunion pour en faire des références pour les zones tropicales et subtropicales en général.

- A contrario, aucune information relative aux stocks de carbone dans les sols de Mayotte, Saint-Barthélemy et Saint-Martin n'a pu être identifiée. Par conséquent, l'extension de l'Etude 4 pour 1000 France à ces territoires se heurte aujourd'hui à ce déficit de connaissances. Un renforcement de ces connaissances contribuera à la recommandation générale formulée précédemment.



Recommandations

La recommandation générale que nous formulons est de préserver les stocks élevés de carbone du sol existants et de limiter au maximum leur diminution dans les territoires ultramarins.

Nous proposons une déclinaison opérationnelle de nos recommandations, abordant à la fois les dimensions politiques, organisationnelles, sociales, économiques, techniques et scientifiques, car nous sommes convaincus de leurs interdépendances et de la nécessité d'aborder ce défi de manière systémique.

Au-delà des bénéfices de préservation des stocks de carbone dans

les sols, ces recommandations permettent également de répondre à d'autres enjeux globaux que sont la perte de biodiversité, le changement climatique ou encore la sécurité alimentaire.

① Intégrer dans les outils de programmation et de mise en œuvre de la Politique Agricole Commune (PAC) la rémunération des services écosystémiques associés aux pratiques agricoles et forestières permettant un maintien ou une moindre diminution des stocks de carbone du sol. Le portefeuille des pratiques devra être établi territoire par territoire. Néanmoins, notre étude met en évidence que

la **fertilisation organique**, une meilleure **gestion des apports azotés** pour la canne à sucre, le **non brûlis des résidus** de canne à sucre, l'**agroforesterie**, la mise en place de **plantes de couverture** dans les bananeraies, la **limitation de la profondeur et de la fréquence du travail du sol** ou encore l'inclusion de **jachères temporaires** en maraîchage et culture de tubercules, et la **revégétalisation** de sites miniers répondent à cet objectif. Il en va de même pour les **pâturages tournants** ou le **maintien d'un couvert fourrager** productif sur le long terme pour ce qui relève de la gestion des pâturages.

L'appui à la structuration des filières de diversification agricole sera important dans cette optique, celles-ci ayant toute leur place à jouer dans cet objectif de préservation des stocks de carbone du sol.

De manière générale, il serait important de déterminer les superficies où ces pratiques stockantes pourraient encore être mises en œuvre pour évaluer l'impact escomptable en termes de stockage de carbone.

Par ailleurs, pour la fertilisation organique, il conviendra de s'assurer que celle-ci ne constitue pas un simple transfert de matière (comme par exemple la paille) d'une parcelle agricole vers une autre. Un soutien aux innovations organisationnelles, au sein et entre filières (élevage et production végétale notamment), pour favoriser l'économie circulaire dans la gestion des intrants organiques, serait nécessaire.

2 Lutter contre la spéculation et la rétention de foncier agricole.

Le recours à des pratiques agricoles moins intensives en termes d'intrants de synthèse pourrait nécessiter une extension de la surface agricole. C'est le cas par exemple de l'inclusion de jachères temporaires en maraîchage et culture de tubercules. Ce changement d'itinéraire technique n'est de fait envisageable que si l'accès à des surfaces agricoles supplémentaires est possible, tant en termes de disponibilité foncière que de coût. La préservation des stocks de carbone, du sol ou dans la biomasse aérienne, implique donc des choix et des politiques dédiées d'aménagement du territoire.

Notre étude a mis en évidence que les changements d'usages des sols avaient un impact important sur les stocks de carbone du sol, même si beaucoup reste encore à étudier. **L'intégration de la comptabilité carbone, à travers les Plans Climat Air Energie Territoriaux (PCAET) par exemple et des outils comme ALDO de l'ADEME, pourrait permettre de guider ces choix d'aménagement du ter-**

ritoire sans omettre de prendre en compte le carbone du sol et de la végétation. Cette intégration est particulièrement prégnante pour des territoires comme la Guyane, où la dynamique de changement d'usages des terres majoritairement au détriment de la forêt est élevée, ou encore les Antilles ou La Réunion où la pression urbaine est croissante.

3 Développer des mesures incitatives, encourager le déploiement du dispositif France Relance (Plantons des haies par exemple), et faire de la communication vis-à-vis des pratiques agro-écologiques en général, contribuera à la mise en œuvre des pratiques stockantes identifiées dans cette étude. Ces actions ont néanmoins besoin d'être accompagnées. C'est le sens des deux recommandations suivantes.

4 Faciliter l'accès à l'investissement, aux Coopératives d'utilisation de matériel agricole (CUMA) pour le matériel et aux formations.

La mise en œuvre de certaines pratiques nécessite en effet du matériel spécifique (travail superficiel du sol), de nouvelles connaissances (gestion des plantes de couverture) ou encore des moyens financiers (agroforesterie).



5 Transposer le Label bas-carbone pour contribuer à l'adoption de pratiques stockantes par une incitation économique, en transition à des mesures agro-environnementales de la PAC.



Il ressort que ces actions et recommandations sont étroitement liées les unes aux autres. Nous pensons néanmoins que le levier des politiques publiques est le plus puissant pour concourir à la recommandation générale de préservation des stocks de carbone du sol existants et de limitation de leur diminution dans les territoires ultramarins.

Cette déclinaison opérationnelle des recommandations est présentée de manière synthétique sur la figure ci-dessous.

Besoins de connaissances et actions de recherche

Ces recommandations doivent également s'accompagner d'actions en termes de recherche. Cinq actions de recherche sont identifiées pour contribuer aux recommandations précédentes :

1 Accroître la connaissance des stocks de carbone du sol, et des bilans de gaz à effet de serre, dans les territoires ultramarins pour mesurer l'impact des politiques publiques censées contribuer à la lutte contre le changement climatique. Notre étude a notamment permis de souligner la méconnaissance des stocks de carbone dans les sols forestiers ultramarins, et plus généralement sur près de 4 200 km².

Le Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), par exemple, nécessite d'être renforcé dans les Outre-mer, notamment en Guyane, territoire vaste et diversifié. Il est de fait nécessaire de doter ces DROM d'outils de mesure et de suivi des stocks du carbone du sol à une échelle spatiale permettant de guider les choix d'aménagement du territoire et d'évaluer l'impact de politiques promouvant la mise en œuvre de pratiques agricoles et forestières stockantes.

2 Adapter les méthodes permettant de quantifier les capacités de stockage des sols afin de transposer le Label bas-carbone aux conditions et cultures tropicales. Si cette étude a permis d'initier un tel travail pour les sols agricoles, celui-ci est à poursuivre à La Réunion, à la Martinique et en Guyane. Par ailleurs, le domaine est vierge en ce qui concerne les modèles pour les sols forestiers ou agroforestiers.

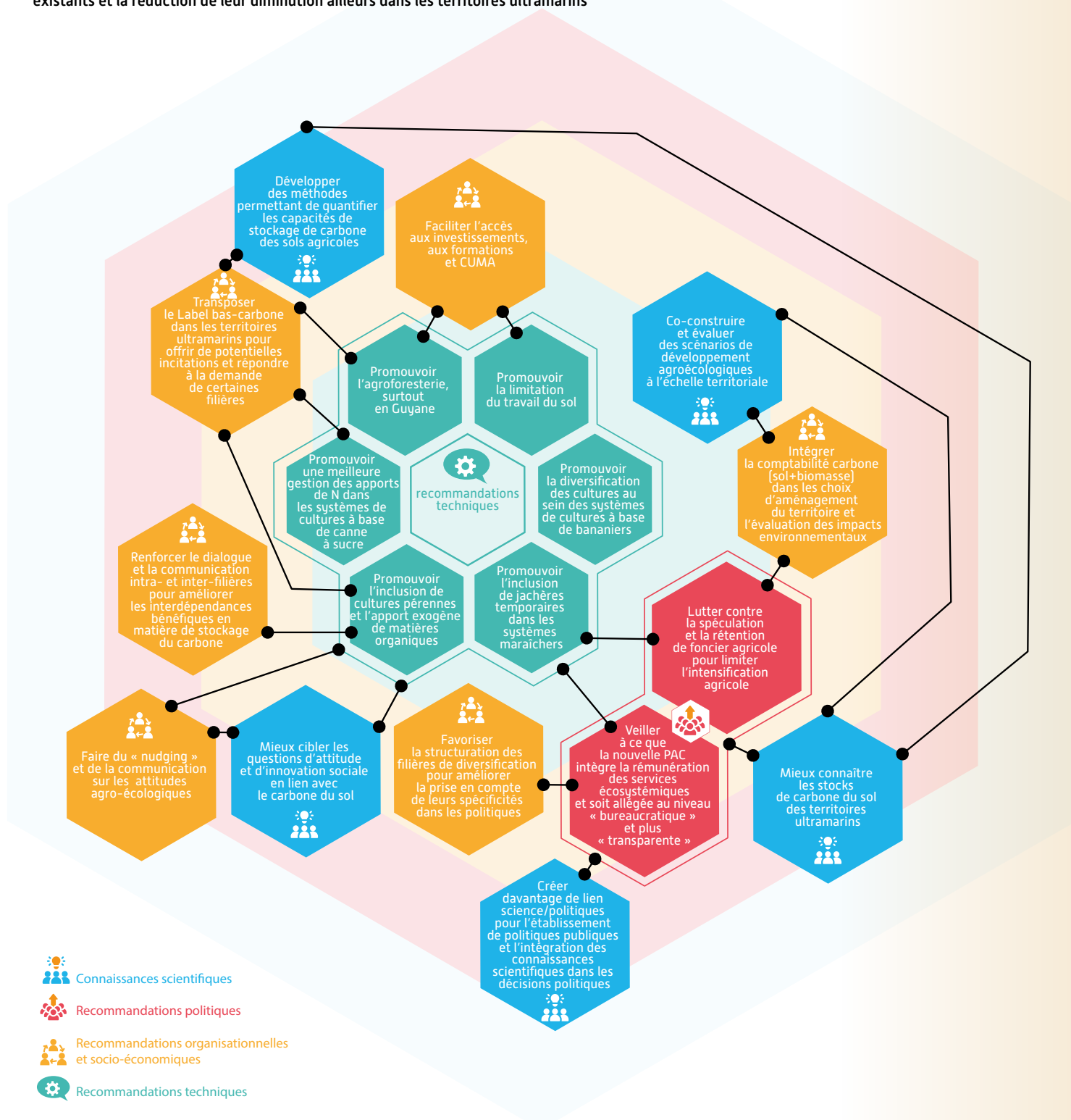
Au-delà du Label bas-carbone, de tels outils permettront d'évaluer de manière *ex-ante* l'impact sur le carbone du sol de pratiques agricoles et forestières.

3 Accentuer les travaux sur les dimensions sociales pour favoriser les innovations. Force est de constater cependant que ce champ d'investigation est jusqu'à ce jour peu exploré alors même qu'il est indispensable pour comprendre les motivations et les freins des différents acteurs et concevoir des politiques publiques ou des outils incitatifs.

4 Développer des approches systémiques d'évaluation de scénarios agroécologiques co-construits à l'échelle de chaque



Figure 22 – Synthèse des besoins de renforcement de **connaissances scientifiques** pour contribuer aux recommandations **politiques**, **organisationnelles et socio-économiques** & recommandations **techniques**. et permettre la préservation des stocks élevés de carbone du sol existants et la réduction de leur diminution ailleurs dans les territoires ultramarins



territoire ultramarin, étant donné la forte intrication des dimensions politiques, sociales, économiques, techniques, environnementales de la question du stockage de carbone. La prise en compte des échelles territoriales semble pertinente pour appréhender ces interactions. Le développement de telles approches relève de la recherche et pose de nombreuses questions méthodologiques.

5 Créer des espaces de dialogue territoriaux et inter-territoriaux entre science, politique et les acteurs agricoles et

forestiers, pour la conception de politiques publiques ou les prises de décisions politiques.

Le caractère fortement intégratif du sol requiert de telles interactions. A notre connaissance, il n'existe pas d'instances établies permettant celles-ci, ce qui constitue un frein à la préservation des stocks de carbone du sol dans les territoires ultramarins.

Ces besoins de recherches sont représentés sur la figure ci-dessous sur fond bleu foncé.



Présentation du territoire

Contexte biophysique

La Guadeloupe est un archipel situé dans la moitié nord de l'Arc des Antilles, entre les îles de Montserrat et Antigua au nord, et la Dominique au sud (Figure 24). L'archipel est constitué de plusieurs îles et îlets : Grande-Terre et Basse-Terre sont les deux plus grandes îles, séparées par un bras de mer. Les autres îles de l'archipel sont Marie-Galante, la Désirade, les Saintes, et Petite-Terre. Grande-Terre présente une topographie plane de faible altitude, tandis que Basse-Terre est une île montagneuse volcanique, dont le point culminant est le volcan de la Soufrière (1 467 m).

L'émergence des îles de la Guadeloupe s'est faite sous l'influence de la formation de l'Arc des Petites Antilles, par subduction de la plaque Amérique sous la plaque Caraïbes. L'âge des roches décroît du nord-est de l'archipel vers le sud-ouest. Le climat est tropical avec un fort gradient pluviométrique est-ouest (ex : Grande-Terre et Marie-Galante, 1000-1200 mm/an, Basse-Terre, 2500-12000 mm/an). Le climat est caractérisé par une saison sèche entre janvier et juin (plus marquée à l'est).

Le relief rencontré à Basse-Terre induit des contrastes de pluie et températures : les régions les plus en altitude sont très arrosées, avec des précipitations annuelles pouvant dépasser les 7 000 mm.

Le développement pédogénétique des sols de Guadeloupe est déterminé par la nature des roches, l'âge de la pédogénèse, et la pluviométrie (Sierra and Desfontaines (2018) ; Figure 25). Les sols dominants en Grande-Terre et à Marie-Galante sont de Vertisols de région subhumide, riches en argiles de type smectite, avec une capacité d'échange cationique (CEC) importante et un pH alcalin. Les Ferralsols se sont développés sur des dépôts volcaniques anciens, sous un climat tropical humide dans le centre et le nord de Basse-Terre. L'altération intense des minéraux primaires entraîne la formation d'oxyhydroxydes de fer et d'argiles de type halloysite, avec un pH acide et une faible CEC, mais présentent des bonnes qualités physiques (Sierra and Desfontaines (2018a)). Les Nitisols (région côtière du sud de Basse-Terre) ont

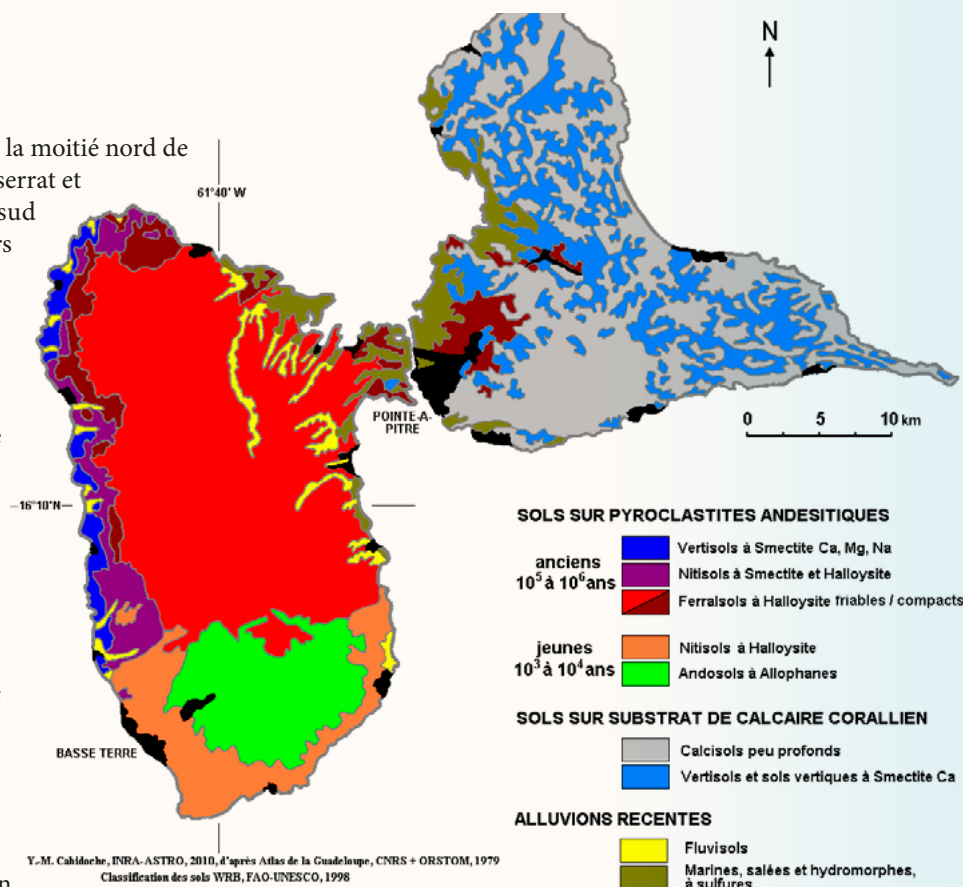


Figure 25 - Carte des sols de Grande-Terre et Basse-Terre à la Guadeloupe. Sierra and Desfontaines (2018), adapté de Cabidoche (2000).

des propriétés proches de celles des Ferralsols, mais se sont développés sur des matériaux volcaniques plus récents, au pied des montagnes volcaniques, et présentent ainsi une CEC plus élevée. Les Andosols sont situés dans le sud de Basse-Terre, en hauteur par rapport aux Nitisols. Ils se sont développés sur des matériaux volcaniques jeunes, et dans des régions très arrosées. Ces conditions entraînent la formation de minéraux amorphes, avec une CEC et une stabilité structurale élevées, les rendant peu sensibles à l'érosion.

Les forêts constituent le mode d'occupation du sol dominant à la Guadeloupe, représentant 49 % de la surface du territoire en 2018 (Agreste (2021)). Ces forêts sont présentes notamment dans la partie ouest et montagneuse de Basse-Terre, dans le pourtour de la baie du Grand-Cul-de-Sac-Marin sous la forme de forêts marécageuses. Les terres arables et les prairies occupent respectivement 17 % et 9 % de la surface de la Guadeloupe en 2018 (Agreste (2021)). Ces espaces agricoles sont présents sur l'ensemble de Grande-Terre et de Basse-Terre, sauf sur la région centrale de cette dernière, occupée par la forêt tropicale. La majeure partie des surfaces en prairie se situent dans le nord-est de Basse-Terre, dans la moitié sud de Grande-Terre ainsi qu'à Marie-Galante. Les cultures de banane occupent la partie sud de Basse-Terre, sur le pourtour du volcan de la Soufrière. Les cultures de canne à sucre sont présentes dans le nord de Basse-Terre et dans la moitié nord-ouest de Grande-Terre. Les cultures maraîchères, de racines et les vergers sont présents dans la plupart des régions agricoles.



Contexte agricole

En 2019, la Guadeloupe compte environ 395 000 habitants et un taux de chômage de 21 % (dont 41 % chez les 15-29 ans). La surface agricole utile est en régression constante depuis 40 ans et représente aujourd'hui 31 800 ha, occupés à 43 % par la canne à sucre et à 32 % par les prairies. La Guadeloupe est formée d'unités paysagères variées où la mise en valeur agricole est contrastée (Figure 26) :

- **L'île de Basse-Terre**, montagneuse, est en grande partie couverte par les forêts, les surfaces consacrées à l'agriculture étant limitées à des espaces situés entre l'océan et les flancs de la chaîne volcanique qui constitue son axe longitudinal. Sur la côte au vent, humide et aux sols fertiles, sont cultivées la banane et la canne à sucre, mais sont également pratiqués le maraîchage et l'horticulture. Sur la côte sous le vent, souvent abrupte et moins arrosée, cultivée en arboriculture à l'ouest et au nord, sont pratiquées des cultures d'exportation qui se combinent à l'élevage.
- **L'île de Grande-Terre**, avec des sols d'origine corallienne, très argileux, est un territoire historiquement exploité en canne à sucre au sein duquel apparaissent des poches dispersées d'agriculture de diversification : dans la zone des Grands Fonds, vallonnée, et au nord-est, se cultivent du maraîchage et le melon de contre-saison.

- **Les « dépendances »** : l'île de Marie-Galante qui est aussi partiellement exploitée en canne à sucre, en association avec l'élevage bovin et porcin, et les autres îles (les Saintes, et la Désirade) qui sont peu exploitées pour l'agriculture.

La taille moyenne des exploitations est de 4,4 ha et l'agriculture représente 3 % de la population salariée (DAAF (2019)). Le secteur agricole, comme dans le reste de la France, est en difficulté, et beaucoup d'exploitants sont âgés. Il en résulte une diminution progressive du nombre d'exploitants et des surfaces agricoles (Tableau 7). Chopin et al. (2015) déterminent 8 types d'exploitations sur le territoire guadeloupéen : spécialisées dans la canne à sucre, canne à sucre diversifiées, canne à sucre et élevage, diversifiées, spécialisées dans la banane, l'élevage, l'arboriculture, et le maraîchage.

La canne à sucre est la première culture de Guadeloupe, à la fois en termes de surface et de nombre d'exploitations (Tableau 7). Les cannes sont valorisées pour la production de sucre et de rhum. La canne est une plante graminée tropicale qui apprécie les températures élevées, un fort ensoleillement et beaucoup d'eau. 95 % des surfaces ont un apport d'engrais minéraux et 98 % des surfaces reçoivent un traitement phytosanitaire. A la Guadeloupe, le nombre de traitements appliqués est de 2,9 pour 2,2 passages annuels. D'après l'enquête sur les pratiques culturales de la canne

	2010	2020	Evolution 2020/2010
Exploitations	7804	7254	-7 %
dont à spécialisation végétale	3982	3207	-19 %
dont à spécialisation animale	1893	2589	37 %
dont mixtes (polyculture et/ou polyélevage)	1910	1420	-26 %
Exploitations sous statut individuel	7547	6942	-8 %
Exploitations en agriculture biologique ¹	0,05	1,8	+1,7 points
Exploitations sous autres signes officiels de qualité ou d'origine ²	0,08	0	-0,08 point
Exploitations vendant en circuit court ³	56,4	59,8	3,4 points
Chefs d'exploitation, coexploitants et associés actifs (nombre de personnes)	7889	7331	-7 %
dont ayant 60 ans ou plus	23	34	+11,6 points
dont femmes	22	20	-2,6 points
Travail agricole (ETP)⁴	7603	6440	-15 %
SAU totale (ha)	31401	31836	1 %
dont terres arables	17679	17258	-2 %
dont canne	14173	12417	-12 %
dont prairies	10250	11222	9 %
dont cultures permanentes	3404	3301	-3 %
dont banane	2453	2327	-5 %
SAU moyenne (ha)⁵	4	4,4	9 %
Cheptel (UGB)	44348	37836	-15 %
dont bovins (UGB)	32056	27496	-14 %

Tableau 7 - Principales données sur les exploitations agricoles guadeloupéennes. [Source : Agreste 2021 issu des Recensements généraux agricoles 2010 et 2020. Légende : 1. Certifiée ou en conversion (cahier des charges officiel) ; 2. Label rouge, IGP, AOC-AOP, STG ; 3. Fleurs et plantes exclues en 2010 ; 4. Hors prestations de service (ETA, CUMA...) ; 5. Y compris exploitations sans SAU]

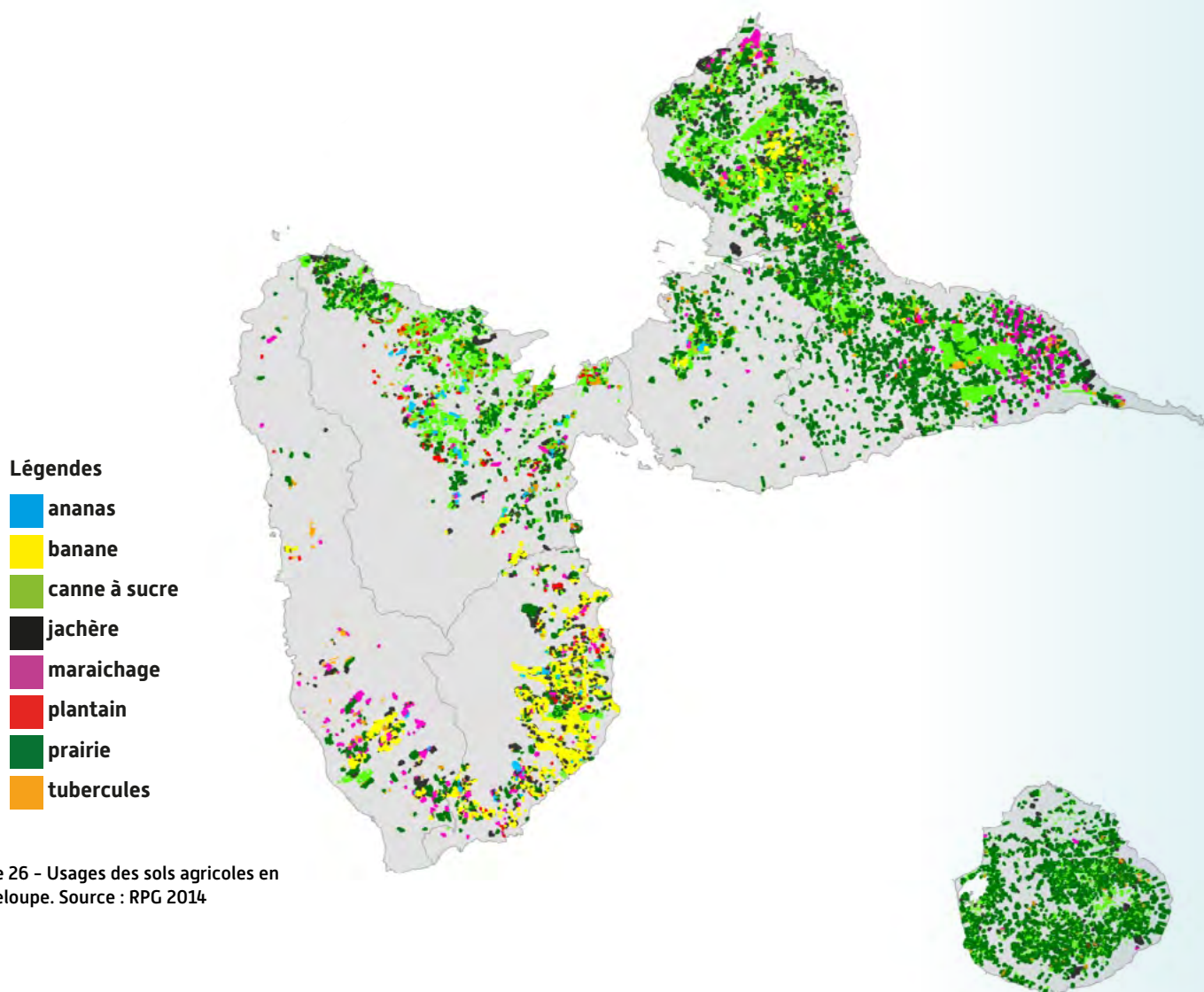


Figure 26 - Usages des sols agricoles en Guadeloupe. Source : RPG 2014

à sucre (Faucher (2018a)), des pratiques pour réduire l'utilisation de pesticides sont progressivement adoptées. La banane occupe le 3^{ème} rang de la surface agricole utile. C'est la variété Cavendish qui est la plus exploitée, elle est destinée principalement à l'exportation. Le nombre moyen de traitements appliqués annuellement s'élève à 10,3 d'après l'enquête sur les pratiques culturales de la banane (Ducrot and Rousseau (2018)). Le maraîchage représente une proportion moindre des surfaces agricoles ; sont cultivés tomates, concombres, salades, melons, etc. La Guadeloupe produit également des tubercules, comme l'igname ou le manioc. Les fruits produits en dehors de la banane sont des ananas, des oranges, des citrons. Un large panel de fruits et légumes poussent sur les territoires antillais. L'élevage est principalement fait à petite échelle. A la Guadeloupe, l'élevage bovin est exclusivement orienté vers la production de viande. De même que pour les porcs, les élevages bovins comptent très peu d'animaux, souvent moins d'une dizaine. La technique « au piquet » est largement répandue. L'élevage caprin et ovin présente des caractéristiques similaires à celui des bovins, les deux élevages sont d'ailleurs souvent associés. Enfin en aviculture, la production de volaille de chair est traditionnelle, elle couvre 12 % de la consommation locale. La production d'œufs repose sur 2 types de systèmes : les élevages traditionnels de moins de 500 poules et les élevages spécialisés.

D'après les derniers chiffres d'Agreste édition 2021, la Guadeloupe détient une SAU de 31 836 hectares avec 7 254 exploitations agricoles et une moyenne de 4,4 hectares par exploitation : elles sont de petite taille. Environ 81 % des exploitations ont une Production

Brute Standard^I (PBS) inférieure à 25 000 euros tandis que 4 % des exploitations détiennent une PBS supérieure à 100 000 euros. En tout, ce sont 19 % des exploitations les plus grandes qui contribuent à 75 % de la production agricole commercialisée. La production agricole est axée essentiellement sur la canne à sucre, la banane et les cultures fruitières et maraîchères. Bien que multiforme, l'agriculture guadeloupéenne présente deux formes principales de production qui sont souvent présentées sous la forme d'un « certain dualisme ». D'une part, il s'agit de la production de monocultures tournées vers l'exportation et utilisant de la main d'œuvre salariée. Ces monocultures dominent le secteur agricole, que ce soit par les volumes produits, les surfaces occupées, la création de richesse ou encore l'accès aux aides publiques. D'autre part, il s'agit des cultures de diversification, qui concernent de nombreuses exploitations de petite surface souvent informelles, fondées sur une main d'œuvre familiale. Elles sont historiquement marginalisées et régulièrement exclues des dispositifs d'aides. D'autres dualismes semblent marquer le secteur agricole guadeloupéen : des espaces aux reliefs accidentés et des plaines, des terres qui bénéficient d'un réseau d'approvisionnement en eau et des terres qui en sont exclues, enfin des filières structurées et des exploitations en dehors de ces organisations.

^I La production brute standard est issue des activités agricoles de l'exploitation : production, commercialisation de produits du sol, de l'élevage et produits de première transformation qui sont en rapport direct avec ces produits.

Une production alimentaire confrontée à de multiples défis

Les Antilles sont dépendantes à hauteur de 80 % des importations pour leur alimentation. En 2017, le déficit des échanges alimentaires était de 410 M€. Le volume importé augmente depuis 1995 tandis que les exportations diminuent en volume. Entre 2007 et 2017, les produits comme les légumes et les fruits frais ont vu leurs importations augmenter de 38 %. Les échanges se font à 74 % avec la France hexagonale, puis avec l'Union européenne à hauteur de 16% (Agreste Commerce extérieur agroalimentaire (Ducrot and Nohara (2018))). L'agriculture est peu diversifiée. L'exploitation de la canne et de la banane sont aujourd'hui les piliers de l'économie agricole à la Guadeloupe mais elles rendent l'agriculture de l'île dépendante des aides financières. Le Programme d'Options Spécifiques à l'Éloignement et à l'Insularité (POSEI), un fonds issu du premier pilier de la PAC (Politique Agricole Commune), s'élevait à près de 67,5 M€ en 2017, dont 49,7 M€ étaient orientés vers la canne et la banane. Le premier pilier subventionne les exploitations en fonction du

nombre d'hectares ; les petites exploitations (81 % du nombre total) sont moins favorisées par ce programme. Le second pilier de la PAC, dédié au développement rural, s'élève à 4 M€, il est complété par des programmes nationaux de 67 M€ dont 63 M€ reviennent à la filière canne (Faucher (2018b)).

L'agriculture est exposée à des aléas climatiques comme des épisodes de sécheresse, l'excès d'eau, les inondations. De plus, le territoire est exposé à l'activité cyclonique. Par exemple, l'ouragan Maria en 2017 a dévasté toute la filière banane (Agreste, Bulletin de conjoncture 2017). Le changement climatique est une réelle menace pour les systèmes agricoles des îles de la Caraïbe.

L'agriculture guadeloupéenne doit ainsi relever le triple défi de :

- Mieux conjuguer performances économiques, sociales et environnementales,
- Adapter les systèmes agricoles au changement climatique et atténuer son ampleur,
- Augmenter le degré d'autonomie alimentaire du territoire.

Stocks de carbone dans les sols et principaux déterminants

Stocks de carbone du sol selon le type de sol

La typologie des sols explique en partie la variabilité des stocks de carbone à la Guadeloupe. Les Andosols d'altitude (>350 m) sont les sols qui stockent le plus de carbone, avec en moyenne 121 tC/ha (couche 0-25 cm) (Figure 27). Les Ferralsols et les Nitisols présentent les stocks les plus faibles, avec respectivement 55 et 45 tC/ha. Les Andosols de basse altitude et les Vertisols présentent des valeurs intermédiaires entre ces deux pôles. La minéralogie des sols explique ces variations, avec dans

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

Malgré ces grandes tendances, il subsiste une importante hétérogénéité dans la distribution des stocks de carbone par grand type de sol (Figure 27). Les coefficients de variation (CV) sont supérieurs à 25 pour certains types de sols, notamment les sols andiques. La typologie des sols intègre les propriétés minéralogiques des sols de façon discrète, or il a été montré que dans les sols andiques, les proportions de phases minéralogiques participant à la stabilisation de la matière organique étaient variables, et contrôlaient de façon linéaire les teneurs et stocks de COS (Allo (2019) ; Basile-Doelsch et al. (2005) ; Chevallier et al. (2019)). A la Guadeloupe, la relation quantitative entre minéralogie des sols et teneurs en COS a été étudiée sur une population d'Andosols, le long d'un gradient altitudinal ; cette relation est traitée dans la section suivante.



Paysage de prairie et de volcan en Guadeloupe
(crédit photo : J-M. Blazy)

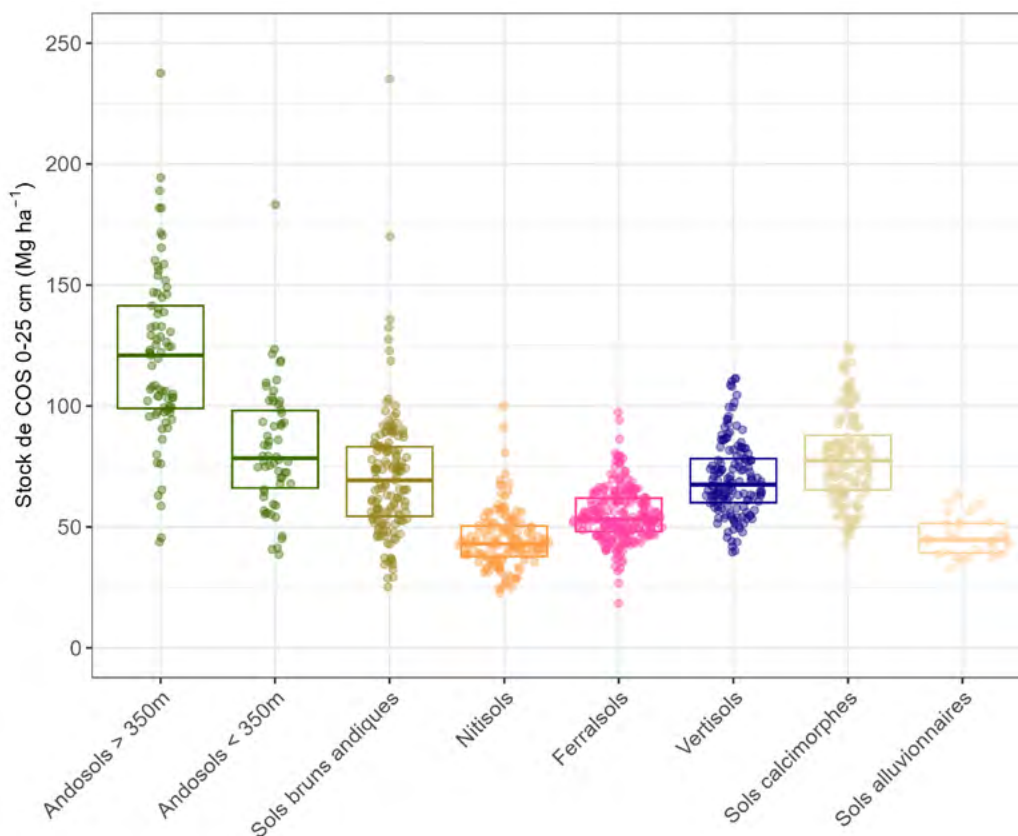


Figure 27 – Stocks de carbone organique du sol (COS) selon le type de sol à la Guadeloupe. Source : Base de données TropÉmis & CaribAgro, R. Rochette et Sierra (2015b). Les types de sols présents dans la base de données ont été simplifiés.

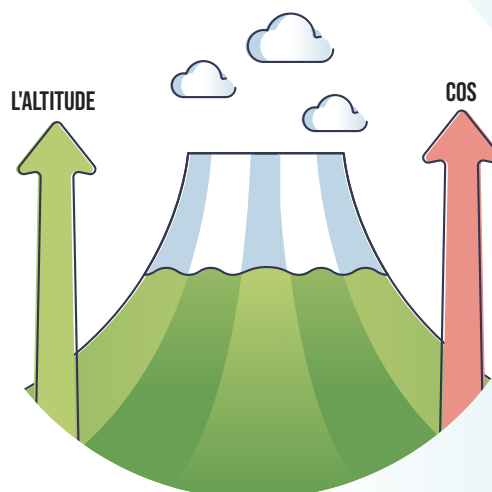
Stocks de carbone du sol selon l'altitude

L'effet de l'altitude sur les stocks de carbone a été spécifiquement étudié à la Guadeloupe dans le cas des Andosols présents dans le sud de Basse-Terre, développés sur des dépôts volcaniques récents et cultivés en banane ou maraîchage. Comme cela a été montré plus haut, les stocks de carbone sont plus élevés pour les Andosols présents à une altitude supérieure à 350 m que pour les Andosols présents à une altitude inférieure à 350 m. L'étude de Sierra et Causeret (2018) a permis de mettre en évidence l'effet de l'altitude sur la variation des stocks de carbone, à l'aide d'une approche expérimentale et de modélisation permettant d'estimer les entrées de carbone (via les résidus aériens et souterrains des plantes cultivées) et les sorties de carbone (reliées

à la constante de minéralisation de la matière organique), le long du gradient altitudinal (de 100 m à 700 m). Si les rendements de banane décroissent avec l'altitude, se traduisant par une diminution des entrées de carbone de 44 %, la constante de minéralisation de la matière organique décroît de manière encore plus marquée (570 %) le long de ce gradient. Ces résultats montrent ainsi que dans ce contexte volcanique et montagneux, l'augmentation de l'altitude se traduit par une pluviosité plus importante, déterminant la formation d'allophanes, qui exercent une importante stabilisation de la matière organique dans les Andosols, leur conférant des stocks de carbone élevés malgré des entrées de carbone plus faibles qu'à basse altitude.

Stocks de carbone du sol selon les propriétés chimiques des sols

La variabilité des stocks de carbone a été étudiée dans les monocultures de banane du sud de Basse-Terre (Blanchart et al. (2004) ; Clermont-Dauphin et al. (2004)). Cette étude a mis en évidence l'effet positif des charges variables (différence entre le pH_{eau} et le pH_{KCl}) sur les stocks de COS, dans les Andosols et Nitisols. L'état des charges variables est conditionné par la teneur en carbone organique mais également le pH, lui-même influencé par la teneur en calcium (Ca) des sols. La teneur en Ca contribuerait donc à la stabilisation de la matière organique dans ces sols.



Stocks de carbone du sol selon l'usage des sols

L'évolution tendancielle des stocks de carbone du sol en fonction de l'usage des sols a été mise en évidence à la Guadeloupe par Sierra et al. (2015a), en analysant les variations de stocks de carbone dans des parcelles issues de la base de données CaribAgro-TropEmis et échantillonnées à plusieurs reprises entre 1998 et 2014 (analyse diachronique). L'étude de ces variations met en avant deux grandes tendances selon le mode d'usage des sols : les stocks de carbone des sols des cultures dites de diversification (maraîchage, ananas, tubercules, melon) présentent une tendance à la baisse, comprise entre -1,6 %/an et -0,1%/an (Sierra et al. (2015a)). Dans les systèmes de cultures destinées à l'export (cultures pérennes de banane ou canne), des tendances contrastées sont observées selon les situations, avec de faibles baisses des stocks de carbone, jusqu'à des augmentations de 0,8 à 0,9 %/an (Sierra et al. (2015a)) (Figure 28).

Ces différences selon le mode d'usage sont expliquées par de moindres apports de carbone dans les systèmes de diversification, et par l'intensité du travail du sol (nombre de passages d'outils par unité de temps) plus élevée dans ces systèmes. Les conditions pédoclimatiques influencent les variations observées : dans le cas des monocultures de banane, d'une part, la

probabilité d'assister à une diminution tendancielle des stocks de carbone augmente avec les stocks de carbone initiaux et, d'autre part, les Ferralsols du nord de Basse-Terre sont plus sensibles à la diminution des stocks de carbone que les Andosols d'altitude. Ces résultats illustrent l'effet d'une minéralisation de la matière organique plus faible dans les Andosols des régions hyper humides.

Pour les systèmes de diversification, les baisses de stocks de carbone observées sont plus importantes dans les régions humides (Basse-Terre) que dans les régions subhumides (Grande-Terre). Ces différences peuvent être expliquées par plusieurs raisons selon les situations, telles que : i) des stocks de carbone initiaux plus élevés dans les régions humides, ii) des apports de carbone par les résidus de culture plus faibles dans les Ferralsols (région humide) que les Vertisols (région subhumide).

Dans le cas de rotation ou de changement d'usage des terres, la transition d'une culture de canne à sucre vers des cultures maraîchères ou de tubercules provoque une diminution du stock de carbone de 11 % en 4 ans (soit 2,75 %/an), tandis que la transition d'une culture de bananes vers une culture d'ananas entraîne une diminution du stock de carbone de 15 % en 6 ans

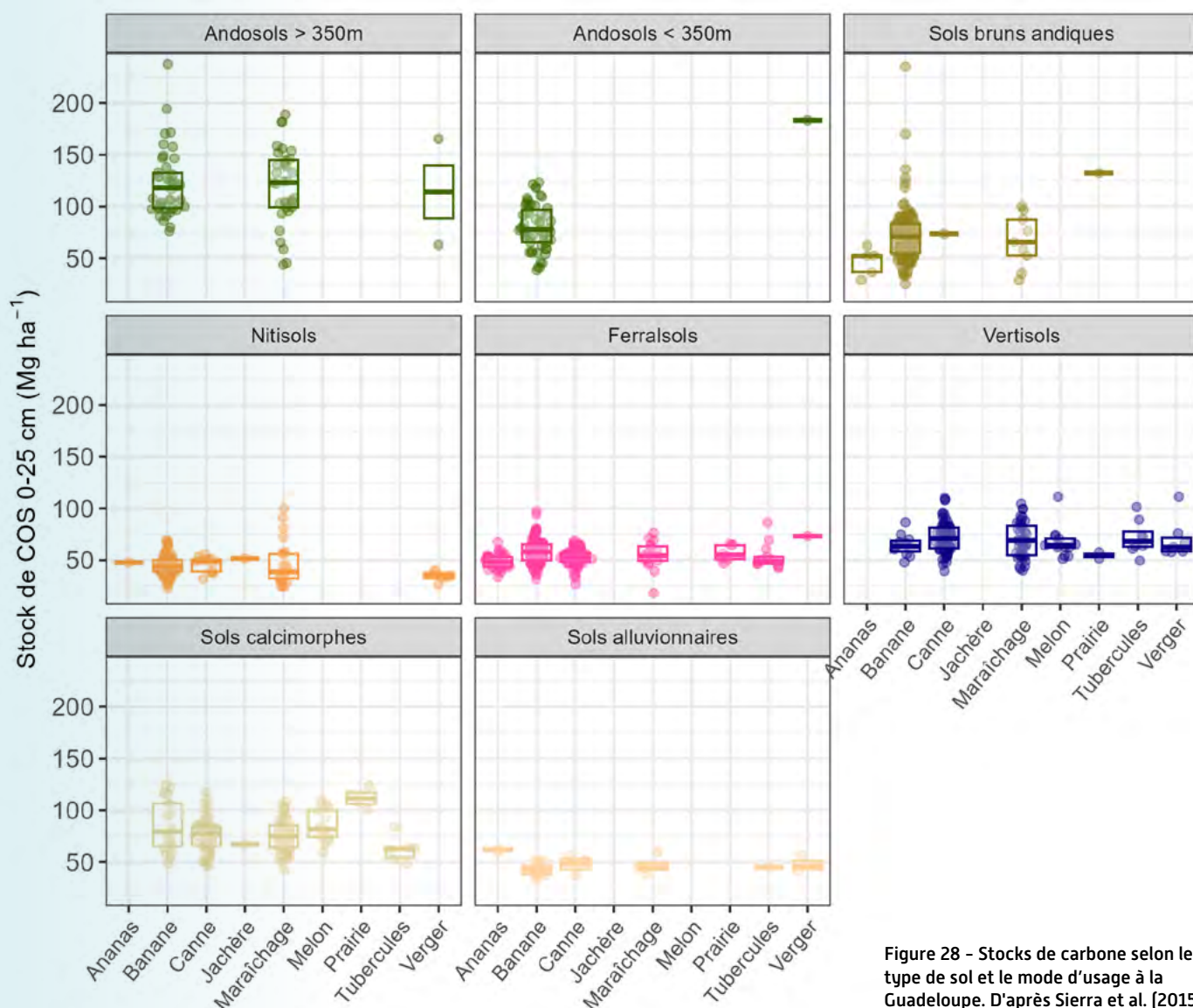


Figure 28 - Stocks de carbone selon le type de sol et le mode d'usage à la Guadeloupe. D'après Sierra et al. (2015).

(soit 2,5 %/an). Ces diminutions de stocks de carbone sont attribuées à la fois à la réduction des apports de carbone dans les systèmes de cultures annuels, tandis qu'ils sont continus via les systèmes racinaires des cultures de canne à sucre et de bananes, et à l'augmentation de la minéralisation du carbone sous l'effet du travail du sol plus fréquent et plus intense dans ces systèmes annuels^{II}.

^{II} Dans les plantations de canne à sucre, un travail du sol est effectué tous les 7 ans environ.

**Baisse du COS de
1.6 à 0.1 % par an
si diversification
des cultures avec
pratiques actuelles**



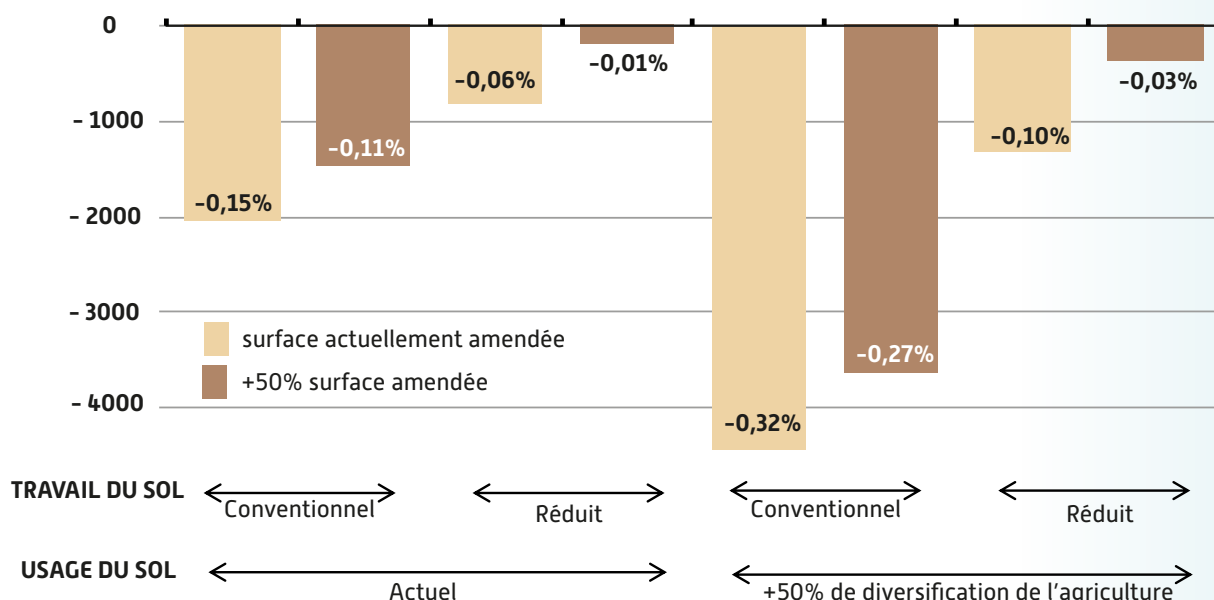
Effet des pratiques sur les stocks de carbone du sol

L'utilisation d'amendements organiques (ex : compost) afin de réduire l'impact du changement d'usage des sols (ex : canne à sucre vers une culture annuelle) sur les stocks de carbone a été analysée à la Guadeloupe par Chopin and Sierra (2019, 2021) (Figure 29). L'apport nécessaire de compost pour maintenir le niveau initial de stock de carbone est en moyenne 10 tonnes de matière fraîche/ha/an, ce qui constitue une valeur inatteignable à l'échelle de la Guadeloupe compte tenu des surfaces importantes cultivées en canne (Grande-Terre et nord de Basse-Terre) et de la production actuelle de compost. L'apport nécessaire de compost a également été évalué dans l'hypothèse d'une réduction de l'intensité du travail du sol dans les cultures maraîchères, qui abaisserait la constante de minéralisation de la matière organique. Avec cette hypothèse, les apports nécessaires de compost pour maintenir les stocks de carbone atteindraient 23 000 tonnes de matière fraîche/an, ce qui est proche de la production actuelle de compost à la Guadeloupe. Ces simulations suggéreraient que l'intensité du travail du sol dans les cultures annuelles détermine de façon importante les variations de stocks de carbone dans ces systèmes.

Chopin and Sierra (2019) ont simulé à l'échelle de la Guadeloupe sur la période 2015-2045 l'effet d'une augmentation de 50 % de

la surface consacrée aux systèmes de cultures annuels, aux dépens des cultures pérennes, avec deux modalités d'utilisation d'amendements organiques (apports observés actuellement *vs* doublement des surfaces amendées avec les taux d'apports observés actuellement) et deux modalités d'intensité du travail du sol (labour *versus* travail du sol par disques). Les résultats de ces simulations montrent que dans l'ensemble des scénarios, la transition des systèmes pérennes vers des systèmes annuels entraîne une baisse plus marquée des stocks de carbone que dans le scénario *business-as-usual* (-0,15 %/an dans le scénario *business-as-usual*, -0,32 %/an dans le scénario identique mais avec transition vers des systèmes annuels). La mise en place de pratiques de gestion favorables au stockage du carbone (apports d'amendements organiques et réduction du travail du sol) permet de limiter l'effet du changement d'usage sur la baisse des stocks de carbone. Dans le scénario qui combine ces pratiques, les stocks de carbone simulés diminuent faiblement (-0,03 %/an), ce qui constitue une baisse plus faible que celles simulées dans le scénario sans changement d'usage mais avec une moindre adoption de ces pratiques. La mise en place de certaines pratiques de gestion dans les cultures annuelles permettrait donc de limiter l'effet négatif des changements d'usage vers ces systèmes à la Guadeloupe.

Figure 29 - Variations simulées des stocks de carbone (SOC) à la Guadeloupe sous l'effet des pratiques (travail du sol et amendement organiques). BAU correspond au scénario *business-as-usual* (maintien des surfaces destinées aux cultures pérennes d'export, sans changement des pratiques). Les valeurs entre parenthèse correspondent à la variation annuelle des stocks de carbone par rapport au stock de carbone initial. D'après Chopin et Sierra [2019].



QUELQUES CULTURES PARTICULIÈRES

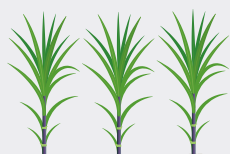


banane

L'effet des pratiques de gestion dans les monocultures de banane sur les stocks de carbone n'a pas été spécifiquement étudié à la Guadeloupe. Les résultats du projet TropEms montrent cependant que les pratiques conventionnelles à la Guadeloupe permettent le maintien voire l'augmentation des stocks de carbone, dès lors que les stocks de carbone initiaux ne sont pas extrêmement élevés [Sierra et al. (2015b)].

Les résidus de culture sont laissés au sol et le travail du sol n'est que ponctuel, au moment de la plantation ; ces deux pratiques favorisent donc le stockage de carbone.

En revanche, le recours aux intrants de synthèse est très important, la fertilisation minérale dans les systèmes bananiers contribue donc de façon significative au bilan gaz à effet de serre de la filière [Svanes and Aronsson (2013)].



canne à sucre

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

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

En revanche, le chaulage des sols acides [Ferralsols du nord de Basse-Terre] pourrait être une pratique de gestion favorisant le stockage de carbone dans les systèmes de canne à sucre, en raison d'une augmentation du rendement en canne, et donc des restitutions de carbone par les résidus de culture, dans les sols chaulés [Sierra et al. (2015a, 2015b)].

A l'échelle globale, le bilan gaz à effet de serre du chaulage des sols acides serait néanmoins neutre, en raison des émissions de CO₂ liées à la dissolution des carbonates une fois apportés au sol, et à l'extraction et au transport des roches carbonatées [Wang et al. (2021)].

Canne à sucre après récolte (crédit photo : R. Fauconnier)



L'effet de l'exportation de la biomasse de canne a été étudié en Guadeloupe dans le cadre de l'évaluation de l'implantation de cultures de canne à destination de la filière énergie sur des sols pollués à la chlordécone, impropres aux cultures à destination de l'alimentation [Sierra et al. (2016)].

Les transitions étudiées [canne à sucre vers canne énergie et banane vers canne énergie] constituent donc des changements d'usage, cependant l'étude a évalué l'effet de différents niveaux d'exportation de la biomasse de canne énergie sur les stocks de carbone.

L'effet de l'export de la biomasse de canne énergie a été simulé par le modèle MorGwanik, selon trois modalités :

1. export total de la biomasse aérienne de canne ;
2. estimation de la quantité de canne exportée permettant de maintenir les stocks de carbone ;
3. estimation de la quantité de compost apporté tous les cinq ans et permettant de maintenir les stocks de carbone en cas d'export total de la biomasse aérienne de canne.

Les résultats de ces simulations montrent qu'un export total de la biomasse de canne [82 tonnes/ha de matière sèche] fait baisser les stocks de carbone de manière importante (27 % en 30 ans avec des parcelles de canne à sucre comme référence, 19 % en 30 ans avec des parcelles de banane en référence). La quantité nécessaire de carbone apporté par restitution partielle de la biomasse aérienne de canne énergie pour maintenir les stocks de carbone est de 4 tC/ha pour la parcelle précédemment occupée par la canne à sucre, et de 2,5 tC/ha pour celle précédemment occupée par la banane, correspondant à respectivement 13 et 8 % de la biomasse récoltable de canne énergie. La quantité nécessaire de compost apporté tous les 5 ans pour maintenir les stocks de carbone malgré un export total de la biomasse de canne énergie est respectivement de 8,4 tC/ha et 5,3 tC/ha pour les parcelles précédemment sous canne à sucre et banane.

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





cultures annuelles

Les systèmes comportant des cultures annuelles (ananas, melon, maraîchage, tubercules) ont tendance à déstocker du carbone en Guadeloupe, en raison du travail du sol intense et fréquent dans ces systèmes, et des apports de carbone par les résidus de culture plus faibles que dans les cultures pérennes de canne ou banane. Comme cela a été montré précédemment, le développement de ces cultures annuelles aux dépens des cultures pérennes entraînerait donc une baisse des stocks de carbone, mais cette baisse peut être limitée par le recours aux amendements organiques et à la diminution de l'intensité du travail du sol [Chopin and Sierra (2019)]. La réduction de l'intensité du travail du sol présenterait un important potentiel d'atténuation de la baisse des stocks de carbone, en particulier pour les Ferralsols.

Ce changement de pratique induirait la transition du labour par retournement vers des pratiques de travail du sol comme le passage de disques. L'effet des pratiques de gestion dans des systèmes de diversification comportant des cultures annuelles a été étudié par Sierra et al. (2017), en couplant une analyse de la typologie de ces fermes en Guadeloupe avec une approche de modélisation des stocks de carbone sous l'effet des pratiques de gestion. 72 fermes ont été étudiées, au sein desquelles ont été menées des enquêtes pour connaître avec précision les pratiques de gestion employées (rotations, apports d'amendements, fertilisation, travail du sol) et les rendements. Les stocks de carbone ont également été mesurés dans les parcelles de ces fermes, dans la couche 0-25 cm. Cinq types de fermes ont été discriminés. Le niveau de stocks de carbone mesuré dans ces fermes a été comparé au stock initial, dont la valeur a été déterminée par simulation (modèle MorGwanik) pour une situation de référence (canne ou banane) et selon les différents types de sol.



Caféiers et bananiers en culture intercalaire (crédit photo : D. Duris)

Les résultats de cette étude mettent en avant l'effet des pratiques de gestion sur l'évolution des stocks de carbone. Au terme des 30 années de simulation, les parcelles des fermes avec rotation entre prairies et maraîchage et celles avec cultures maraîchères et apports d'amendements organiques voient leurs stocks de carbone augmenter par rapport au stock de carbone de référence (sous cultures pérennes). Les pratiques de jachères longues entre les cycles de maraîchage et d'apports de compost ont donc été identifiées comme cruciales dans un objectif d'augmentation des stocks de carbone. Afin de maintenir les stocks de carbone, la période de jachère entre les cycles de maraîchage devrait être deux fois plus longue que la période de culture maraîchère. Cependant, avec des apports de compost de l'ordre de 10 tonnes de matière fraîche/ha/an, la durée de la jachère peut être réduite à une durée égale à celle du cycle de maraîchage.



prairie

L'effet des pratiques de gestion dans les prairies de Guadeloupe sur les stocks de carbone a été relativement peu étudié, cet usage étant peu représenté dans la base de données TropEmiss-CaribAgro. Les prairies représentent pourtant des surfaces importantes dans l'archipel : environ 25 000 ha en 2018, soit la moitié de la SAU [Agreste (2019)]. Ces prairies (qualifiées en Guadeloupe de « savanes ») sont généralement gérées de façon extensive, pâturées et sans apport d'intrants. Une étude a cependant été menée sur le site expérimental du Godet, portant sur la mise en place de pratiques agroforestières dans une prairie naturelle de *Dichanthium aristatum* [Dulorme et al. (2003)]. Le site d'étude est situé dans le nord de Grande-Terre, sur des Vertisols. Des lignes d'arbres légumineux (*Gliricidia sepium*) ont été plantées dans ces prairies, avec une gestion sans pâturage mais export de l'herbe fauchée et des résidus de taille des arbres.

Cette étude s'est focalisée sur l'effet de l'implantation d'arbres fixateurs d'azote sur le cycle de l'azote, mais les teneurs en stocks de carbone ont également été mesurées au cours de l'étude. Les mesures de stocks de carbone ont été effectuées en 1989, avant l'implantation des arbres, et en 2 000, sur une profondeur de 20 cm, dans les parcelles agroforestières et dans les parcelles témoin, sans arbres. Dans les deux modalités les stocks de carbone ont augmenté, mais avec un taux plus élevé dans le cas des parcelles agroforestières : 1,9 tC/ha/an vs 1,7 tC/ha/an dans les parcelles témoin. En moyenne, la pratique de l'agroforesterie a donc provoqué un stockage additionnel de 0,2 tC/ha/an sur ces parcelles.

Stocks de carbone du sol sous l'effet du changement climatique

Dans la lignée des résultats de Sierra et al. (2015a) sur les trajectoires des stocks de carbone observées à la Guadeloupe, Chopin and Sierra (2019) ont simulé à l'aide du modèle MorGwanik l'évolution des stocks de carbone sur la période 2015-2045, pour l'ensemble des sols de Guadeloupe et pour deux grands types de production : les cultures pérennes destinées à l'exportation (canne, banane), et les cultures de diversification pour le marché local (maraîchage, tubercules, ananas, melon). Les simulations ont été effectuées selon deux scénarios climatiques : un scénario avec le climat actuel, et un scénario de changement climatique pour le XXI^{ème} siècle élaboré par MétéoFrance, qui se traduit à la Guadeloupe par une augmentation des températures de 0,7 °C dans la période considérée, et sans modification du régime des pluies.

L'effet de cette augmentation de la température se traduit par deux phénomènes pris en compte dans la stratégie de modélisation :

1. une augmentation de la minéralisation de la matière organique du sol, et
2. une modification des entrées de carbone arrivant au sol par les résidus de culture (augmentation de 3,7% pour les plantes en C3 type banane, maraîchage et tubercules, et diminution de 7,4 % pour les plantes en C4 type canne à sucre, sur la période 2015-2045).

Les résultats de ces simulations montrent que la plupart des systèmes de production destinés à l'export (cultures pérennes) stockeraient du carbone sur la période 2015-2045, tandis que la plupart des systèmes destinés au marché local (cultures annuelles) déstockeraient du carbone. Les variations de stocks de carbone sont plus déterminées par les systèmes de produc-

tion (pratiques de l'agriculteur) que par l'effet du changement climatique. Le changement climatique induit néanmoins un déclin des stocks de carbone pour l'ensemble des situations testées, montrant que l'augmentation possible des apports de carbone par les résidus de culture sous l'effet de l'augmentation de la température ne compense pas toujours l'augmentation de la vitesse de minéralisation de la matière organique.

A l'échelle régionale, et en tenant compte de la superficie occupée par chaque type de sol, les deux scénarios, avec ou sans prise en compte de l'effet du changement climatique, conduiraient à un déstockage de carbone (Tableau 8). Le scénario sans changement climatique entraînerait un déstockage de carbone dans les Vertisols et les Andosols sur la période 2015-2045, tandis que les Ferralsols et les Nitisols stockeraient du carbone. Selon le scénario avec changement climatique, seuls les Nitisols stockeraient du carbone, ce qui est attribué à la présence des cultures de banane et de vergers amendés en matières organiques. Les Vertisols et Ferralsols seraient particulièrement touchés par l'effet du changement climatique, avec des diminutions importantes des stocks de carbone. Ces diminutions marquées s'expliquent par la superficie importante occupée par ces sols et par la présence importante de la canne à sucre, dont les restitutions de carbone par les résidus de culture sont négativement impactées par le changement climatique (plantes en C4). Chopin and Sierra (2019) notent cependant que le modèle est fortement sensible aux paramètres biophysiques de la canne à sucre utilisés ; des changements de cultivars pourraient modifier de façon importante les variations simulées de stocks de carbone à l'échelle régionale.

AER	Variation de COS	
	Sans changement climatique Mg C yr ⁻¹	Avec changement climatique Mg C yr ⁻¹
1	-342	-1685
2	21	-459
3	-10	-65
4	181	99
5	79	66
Total	-71	-2044

Tableau 8 - Variations de stocks de carbone simulées à l'échelle de la Guadeloupe sur la période 2015-2045, avec (With) ou sans (Without) simulation de l'effet du changement climatique [CC]. AER 1, Vertisols ; AER 2, Ferralsols ; AER 3, Andosols ; AER 4, Nitisols ; AER 5, mélange de Calcisols et Nitisols. D'après Chopin and Sierra, 2019.

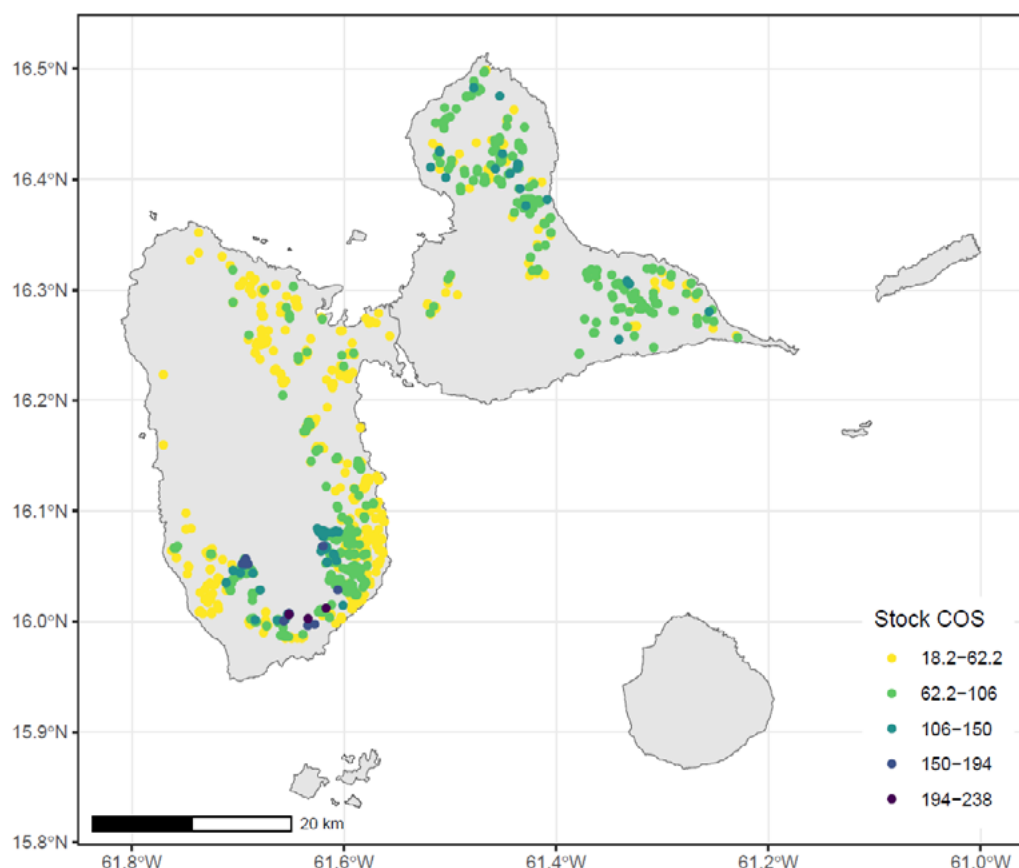


Figure 30 - Carte des stocks de carbone en Guadeloupe (couche 0-25 cm), exprimés en tonnes C/ha.
Source : BDD TropEmiss & CaribAgro, R. Rochette, D. David et J Sierra et al. (2019).

Spatialisation des stocks de carbone du sol

La spatialisation des stocks de carbone n'a pas été réalisée en Guadeloupe. Le projet TropEmiss s'étant focalisé sur les sols cultivés en cultures pérennes et annuelles et ayant pour objectif la calibration d'un modèle de dynamique des stocks de carbone en fonction du pédoclimat et des pratiques des agriculteurs, la base de données constituée au cours du projet ne couvre pas l'ensemble du territoire, et certains modes d'usage sont sous-échantillonnés (les prairies) ou absents de la base de données (ex : les forêts). Il est néanmoins possible de cartographier les points de la base de données TropEmiss-Carib Agro avec les stocks de carbone associés à ces points (Figure 30). La variabilité

observée des stocks de carbone peut être interprétée au regard de la distribution des types de sols. Les stocks de carbone les plus élevés ($>150 \text{ Mg.ha}^{-1}$) se retrouvent dans les hautes altitudes du sud de Basse-Terre, sur des Andosols riches en allophanes. On observe un gradient décroissant des stocks de carbone vers le littoral, avec les valeurs de stocks de carbone les plus faibles observées pour les Nitisols. Les stocks de carbone dans le nord-est de Basse-Terre sont également plutôt faibles, car les Ferralsols sont dominants dans cette région. Les stocks de carbone en Grande-Terre présentent des valeurs intermédiaires, les sols de cette région étant des Vertisols.

Faisabilité de l'application de l'objectif « 4 pour 1000 » en Guadeloupe



Chopin and Sierra (2021) ont réalisé une évaluation de l'objectif « 4 pour 1000 » (accroissement annuel de 0,4 %/an des stocks du carbone du sol) en Guadeloupe en utilisant le modèle MorGwanik et en considérant l'impact du changement climatique pour la période 2015-2045. Plusieurs scénarios ont été testés, lesquels combinaient l'augmentation de l'utilisation des amendements organiques, la réduction du travail du sol, et l'augmentation de la surface agricole dédiée aux cultures de diversification. Les résultats obtenus ont montré que sans aucun changement de la distribution des cultures et des pratiques actuelles, seulement 26 % de la surface agricole pourrait atteindre une augmentation de 4 pour 1000 annuelle des stocks de carbone des sols. Cette surface correspond aux cultures de canne à sucre,

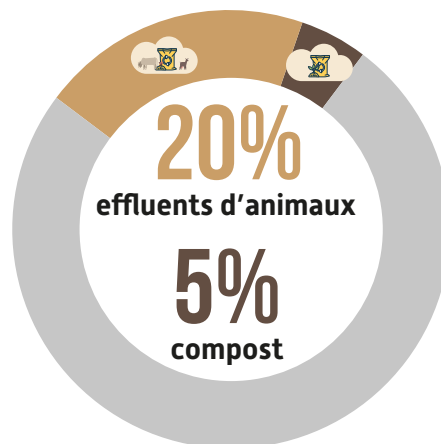
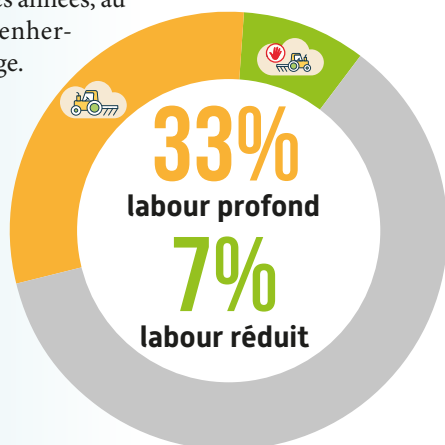
banane et vergers cultivées dans les sols avec les plus faibles stocks actuels. La réduction du travail du sol et l'augmentation simultanée de l'utilisation d'amendements organiques permettraient d'obtenir un tel accroissement annuel (0,4 %/an) sur 31 % de la surface agricole. Cependant, pour tous les scénarios testés il y aurait une diminution comprise entre 0,1 et 3,2 %/an des stocks de carbone à l'échelle de l'ensemble de la Guadeloupe. Ces résultats sont associés au fait que les sols de Guadeloupe sont relativement riches en matière organique, ce qui les rend très sensibles au changement climatique et à l'intensification des pratiques. L'installation des systèmes agroforestiers et l'augmentation de la production et de l'utilisation des amendements organiques pourraient ensemble nuancer cette situation.

Déterminants socio-économiques des stocks de carbone des sols

Usages des sols agricoles : état des lieux

La SAU de la Guadeloupe est principalement occupée par de la canne à sucre et des surfaces en herbe dédiées à l'élevage de ruminants (Figure 31). Le reste des surfaces est occupé par des fruits, principalement de la banane dans le sud de Basse-Terre, ainsi que tubercules tropicaux (ignames, manioc). La Figure 32 montre que les exploitations sont principalement spécialisées, et ceci dans l'élevage, la canne à sucre et les fruits. Peu d'exploitations sont diversifiées.

Comme vu précédemment, si la SAU de la Guadeloupe a considérablement diminué au cours des 40 dernières années, se réduisant presque de moitié, elle s'est aujourd'hui stabilisée autour de 32 000 ha. Les dynamiques de changements d'usages agricoles sont modérées ; on observe toutefois une baisse de la canne à sucre sur les dernières années, au profit des surfaces enherbées et du maraîchage.



Pratiques agricoles (dé)stockantes : niveau de mise en œuvre

Les taux d'adoption des pratiques sont contrastés. Environ 25 % des agriculteurs font usage de fertilisants d'origine organique, principalement issus d'effluents animaux (20 %) et de compost (5 %). L'agroforesterie est pratiquée par 2 à 3 % des exploitants. Le labour profond concerne environ 33 % des exploitations, principalement celles qui sont orientées vers la canne à sucre. Le labour réduit ou le semis direct n'est pratiqué que dans 7 % des exploitations. Ces résultats montrent une marge de progrès importante en matière d'adoption de pratiques plus vertueuses vis-à-vis du stockage de carbone.

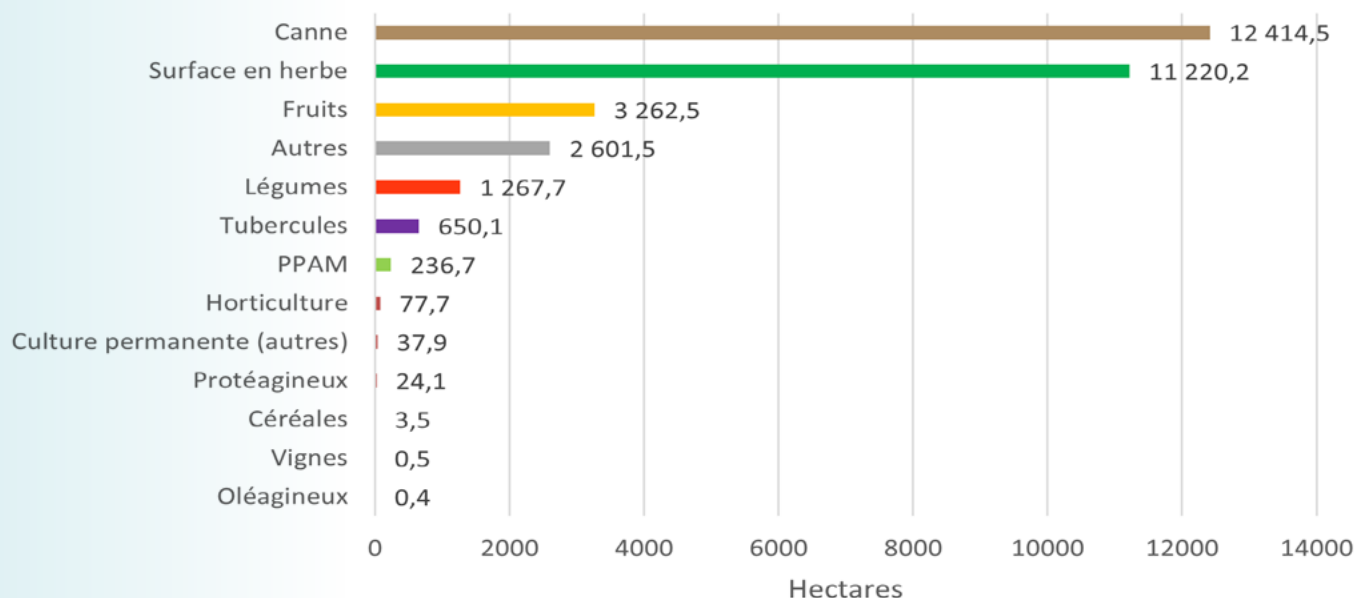


Figure 31 - Usages des surfaces agricoles en Guadeloupe. Source : Recensement Général Agricole 2020

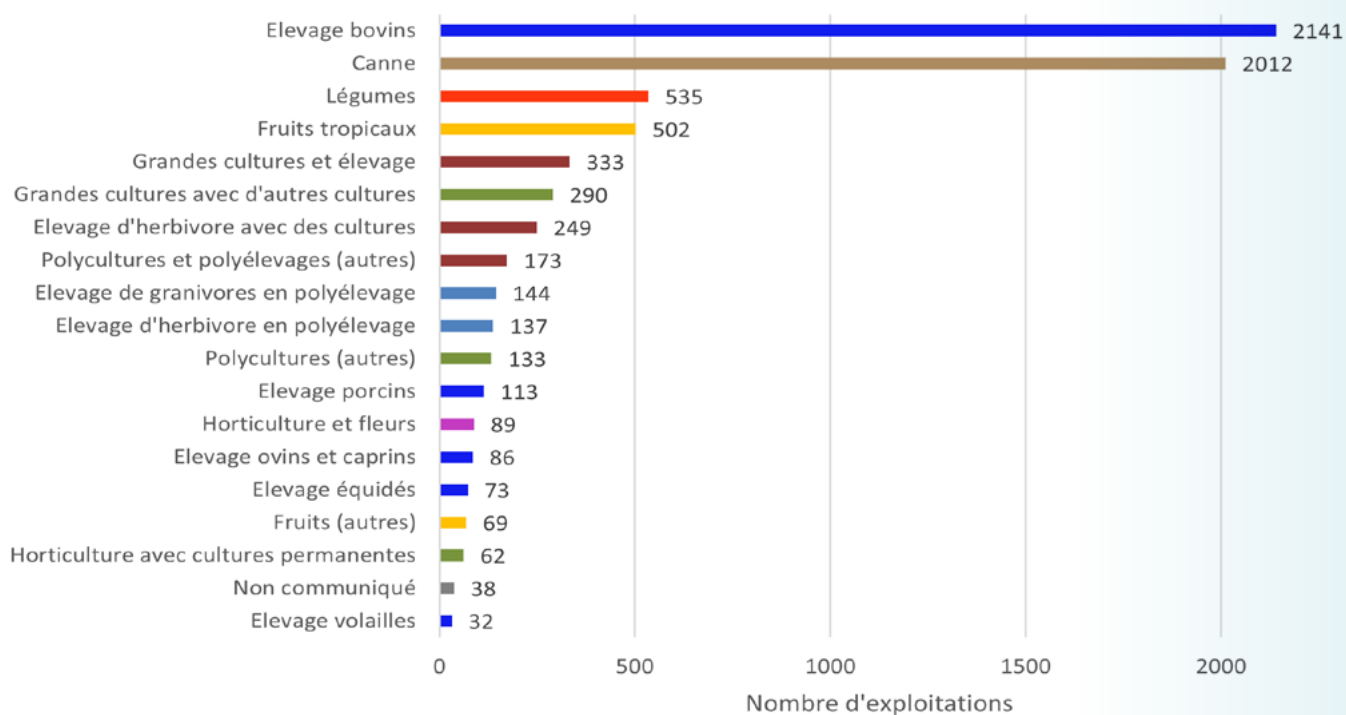


Figure 32 - Orientation productive et spécialisation des exploitations agricoles de Guadeloupe. Source : Recensement Général Agricole 2020

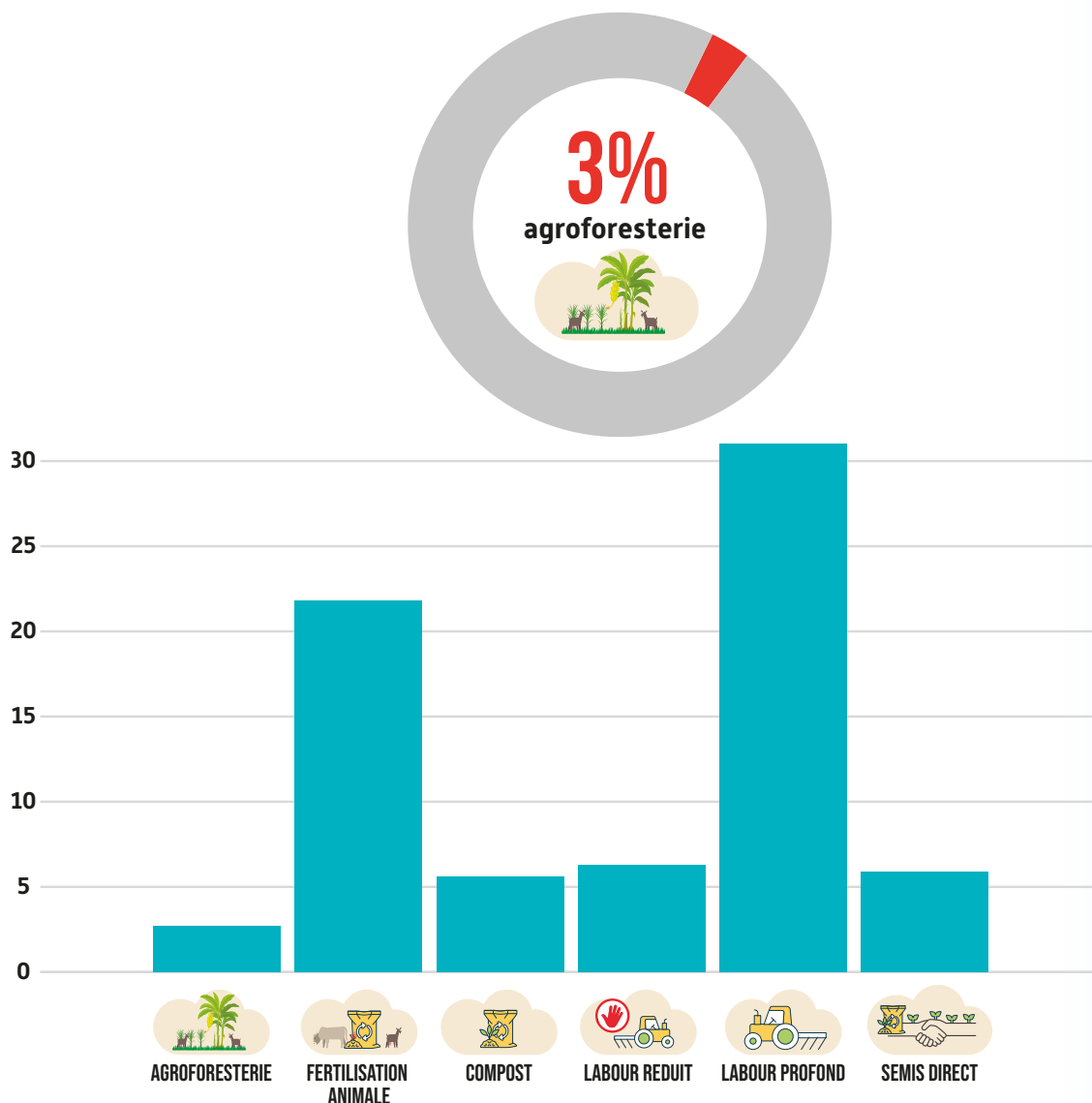


Figure 33 - Taux d'adoption (% des exploitations) des pratiques ayant une influence sur les stocks de carbone des sols agricoles en Guadeloupe. Source : Recensement Général Agricole 2020

Déterminants socio-économiques de l'adoption de pratiques agricoles [dé]stockantes



AGROFORESTERIE

Les facteurs socio-économiques positivement associés à la pratique de l'agroforesterie sont le fait d'avoir une perspective de reprise de l'exploitation, d'avoir réalisé des études supérieures et d'avoir un conjoint qui travaille en dehors de l'exploitation. Comme vu précédemment, cette pratique est souvent associée à l'adoption d'autres pratiques, telles que la fertilisation organique avec du compost. Les facteurs négativement associés à l'agroforesterie sont le fait d'être dans une zone soumise à des contraintes naturelles importantes, et d'avoir une faible dimension économique ($PBS < 4\,000\text{ €}$) et un faible niveau de formation agricole.

Atelier de démonstration de compostage à la ferme en Guadeloupe, organisé par l'AssoFWI et INRAE (crédit photo J. Faverial).



FERTILISATION AVEC EFFLUENTS ANIMAUX

Sans surprise, cette pratique est associée à la présence d'animaux sur l'exploitation agricole. Elle est également positivement corrélée avec la dimension économique des exploitations ($PBS > 25\,000\text{ €}$) et le fait de mobiliser des circuits courts.

Exemple d'association agriculture-élevage à la ferme Karusmart en Guadeloupe (crédit photo : J.-M. Blazy)



FERTILISATION AVEC COMPOST

Cette pratique est déterminée par le fait d'être globalement engagé dans une démarche agroécologique, puisque le fait d'être labellisé en agriculture biologique et de pratiquer un système impliquant d'autres techniques agroécologiques a une influence significativement positive (agroforesterie, labour réduit, semis direct). Le fait d'être situé dans une zone soumise à des contraintes naturelles importantes a en revanche été identifié comme un facteur négatif. Cela peut s'expliquer par les difficultés de transport et d'épandage des composts, qui représentent des volumes importants, du fait des contraintes topographiques.



LABOUR PROFOND

Comme vu précédemment, cette pratique est avant tout associée à la culture de la canne à sucre, mais aussi des légumes. Elle est principalement mise en œuvre par des exploitations ayant une dimension économique importante et ayant recours à de la main d'œuvre salariée et à la fertilisation minérale.



LABOUR RÉDUIT

La réduction du travail du sol est positivement influencée par le fait d'être labellisé en agriculture biologique, de commercialiser en circuit court, de pratiquer une fertilisation organique et de faire partie de groupes d'échanges d'expériences. Cela peut témoigner à la fois d'une prise de conscience des agriculteurs qui pratiquent le labour réduit de l'importance de préserver la fertilité des sols, mais aussi de leur capacité à avoir accès à des formations et des retours d'expérience permettant de réduire l'aversion au risque lié à la mise en œuvre de cette pratique et d'en montrer les bénéfices.



SEMIS DIRECT

Cette pratique est positivement associée au fait d'être situé dans une zone non soumise à des contraintes naturelles, d'avoir recours à du travail saisonnier, de commercialiser en circuit court. Comme mentionné plus haut, le fait de pratiquer la fertilisation organique et l'agroforesterie est statistiquement associé à la pratique du semis direct, ce qui témoigne de la mise en œuvre d'un système de culture agroécologique (ensemble de pratiques agroécologiques). Un autre déterminant important est le fait d'avoir recours à une banque de Travail Agricole ou à des mécanismes d'entraide formalisée, ou d'être membre d'une Coopérative d'Utilisation du Matériel Agricole. Cela montre l'importance de la flexibilité et de l'accès à du matériel spécifique pour la mise en œuvre de cette pratique. Le fait de ne pas avoir de formation agricole est un déterminant négatif.

Travail du sol dans les bananeraies (crédit photo : J-M. Blazy)



Expérimentation du mulch en maraîchage à la ferme Karusmart en Guadeloupe (crédit photo : J-M. Blazy)

Apport de matières organiques dans les bananeraies (crédit photo : J-M. Blazy)



CONCLUSION

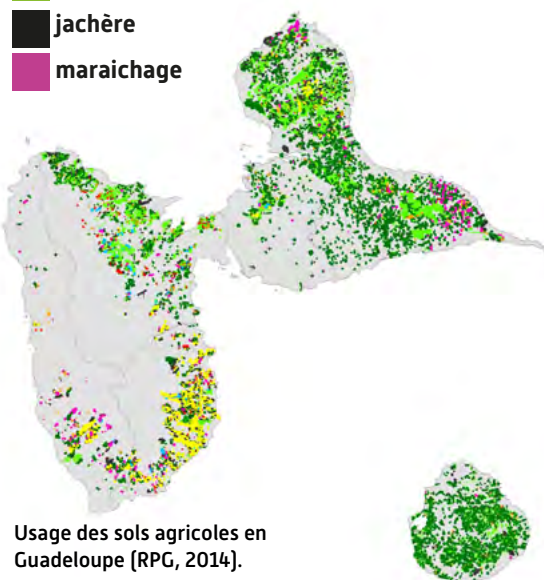
Cette étude montre une marge de progrès importante en Guadeloupe dans l'adoption de pratiques ayant un impact positif sur le carbone du sol. Néanmoins, on pourrait songer que ces pratiques pourraient se développer à l'avenir, car elles sont tout de même déjà pratiquées par certains agriculteurs et pourraient donc essaimer dans le territoire. Au-delà, les déterminants de leur mise en œuvre identifiés montrent que la question de leur adoption renvoie à la question de la transition agroécologique en général : celle-ci requiert de la formation, une plus grande flexibilité, de la mutualisation de moyens de production (équipement) et le développement de circuits de commercialisation en Agriculture Biologique ou de proximité.

Le pédoclimat : clé de voûte du stockage de carbone dans les sols de Guadeloupe

La Guadeloupe présente une forte pédodiversité [ferralsols, vertisols, nitisols, andosols, calcisols, fluvisols] qui représente environ 30% des sols tropicaux. Cette diversité résulte de la variation des roches mères [volcanique, calcaire, alluvions marines], du gradient pluviométrique [de 0,8 à 12 m/an] et de la durée de la pédogenèse [de 103 à 106 années]. De ce fait, ces sols ont développé une large gamme de minéraux argileux dont la teneur dépasse 70%, caractérisés par une grande et contrastée capacité de stabilisation de la matière organique [MO]. Ces traits sont à l'origine d'une forte variabilité spatiale des stocks de carbone à l'échelle de quelques kilomètres : pour la couche 0-25 cm, 90-120 tC/ha pour les andosols [sud de la Basse-Terre en altitude, climat perhumide], 60-75 tC/ha pour les vertisols [Grande-Terre et Marie-Galante, climat subhumide], 50-65 tC/ha pour les ferralsols [nord et centre de la Basse-Terre, climat humide], et 40-55 tC/ha pour les nitisols [région côtière du sud de la Basse-Terre, climat humide] et les calcisols [côte sous-le-vent de la Basse-Terre, climat subhumide]. Le pédoclimat est donc le principal facteur explicatif des stocks de carbone dans les sols de Guadeloupe. Il est intéressant de souligner que, à égalité de climat, ces stocks sont en général 1,5-2 fois supérieurs à ceux observés dans d'autres régions tropicales d'Afrique, d'Asie et d'Amérique du Sud.

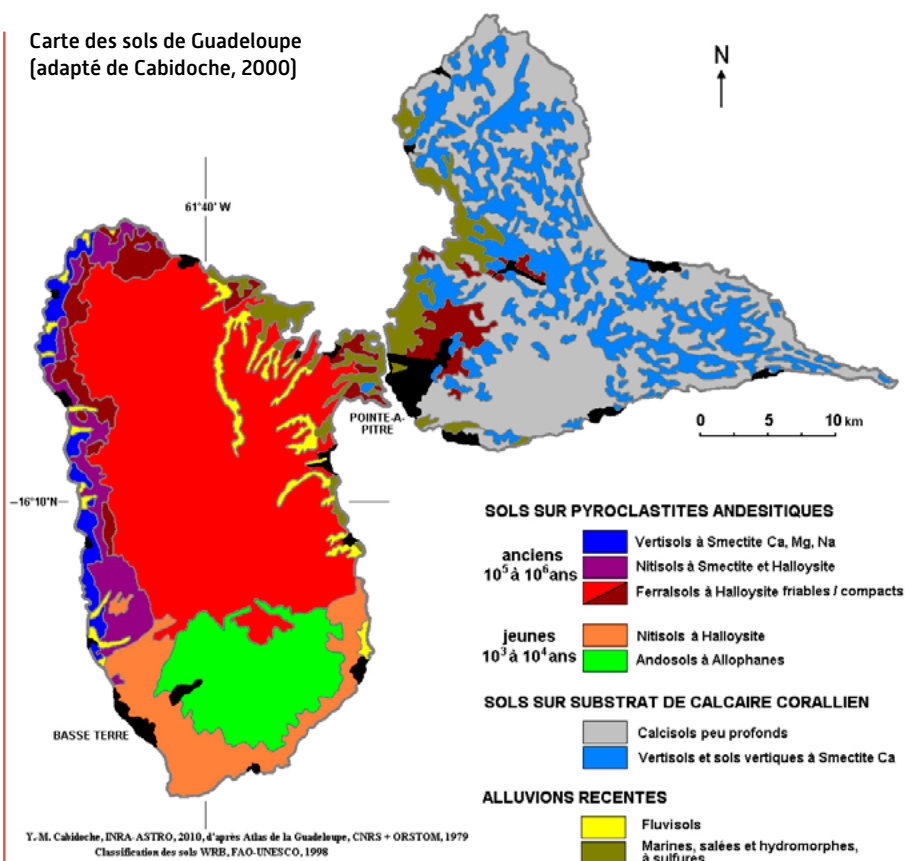
Légendes

ananas	plantain
banane	prairie
canne à sucre	tubercules
jachère	
maraichage	



Usage des sols agricoles en Guadeloupe (RPG, 2014).

Carte des sols de Guadeloupe (adapté de Cabidoche, 2000)



Effet des modes d'occupation du sol et des pratiques culturales

L'agriculture de Guadeloupe est traditionnellement basée sur les cultures d'exportation de type pluriannuel (par ex., la banane et la canne à sucre représentent ensemble environ 50 % de la SAU). Ce type de culture a trois caractéristiques qui favorisent le maintien des stocks de carbone : i) recouvrement rapide et complet [réduction de la température du sol et de la minéralisation de la MO], ii) une importante restitution des résidus de culture (apport de carbone au sol), et iii) un travail du sol relativement peu intensif qui limite la minéralisation [tous les 5-6 ans à la replantation]. Ainsi, certains sols sous banane en Guadeloupe ont des stocks carbonés qui excèdent ceux de la forêt primaire. Les stocks de carbone des sols sous monoculture d'exportation et prairie [savanes] varient peu dans le temps ($\pm 2-3\%$ sur les deux dernières décennies), et se placent couramment dans la tranche supérieure de la gamme des valeurs citées pour chaque type de sol.

Ces stocks déclinent rapidement sous maraîchage et cultures vivrières, ce qui est exacerbé sous l'impact du changement climatique (ex. $-0,5\%/an$ en monoculture maraîchère sur andosol et vertisol). Ces systèmes de culture sont de type annuel, peu couvrants, avec une faible restitution des pailles, et avec un travail du sol très intensif [jusqu'à 8 labours/an]. Le système de culture est ainsi le deuxième facteur en importance affectant les stocks de carbone. Néanmoins, certaines pratiques appliquées par les agriculteurs peuvent contribuer à conserver voire augmenter le stock carboné des sols sous culture annuelle [de $+0,2$ à $+0,4\%/an$], et cela concerne notamment la réduction du travail du sol, l'utilisation des jachères longues et l'application d'amendements organiques (ex. 10 tonnes de compost/ha/an). Cette gestion du sol n'est pourtant pas généralisée en Guadeloupe, et elle est à présent restreinte aux petites exploitations de <1 ha.

Perspectives et recommandations spécifiques

Les recherches développées en Guadeloupe sur le carbone du sol, soulignent que l'enjeu principal est le maintien des stocks carbonés aux niveaux actuels, relativement élevés, ce qui contribuerait à assurer la durabilité de la ressource sol et la sécurité alimentaire dans un contexte contraignant à cause du réchauffement climatique. Cela impliquera des modifications importantes des systèmes agricoles, lesquels devraient faire appel à une plus grande technicité collective (décideurs, profession agricole, recherche) via le recyclage des biomasses, la réduction des labours et le développement des systèmes de culture plus stockants de carbone (agroforesterie, associations de cultures, jachères longues, rotations, prairies améliorées).

En termes de recommandations d'actions politiques, on voit que la question du stockage de carbone dans les sols renvoie à la question de la transition agroécologique. Celle-ci sera facilitée par la structuration des filières de diversification, notamment pour faciliter l'accès aux dispositifs de financements comme les PSE, le développement de l'Agriculture Biologique et des circuits courts (permettant une réhabilitation de la place de l'activité agricole locale sur le marché local) et l'installation de jeunes agriculteurs en facilitant la transmission et l'accès au foncier mais aussi aux financements. La mise en œuvre des systèmes agroécologiques requiert en effet une vision sur le long terme et, face au vieillissement des actifs agricoles, la transmission des savoirs et du foncier est un enjeu clé. En effet, l'adoption par les agriculteurs de systèmes de culture plus stockants de carbone nécessiterait des mesures incitatives de long terme destinées à réduire les coûts de transition, lesquels sont particulièrement élevés en Guadeloupe.

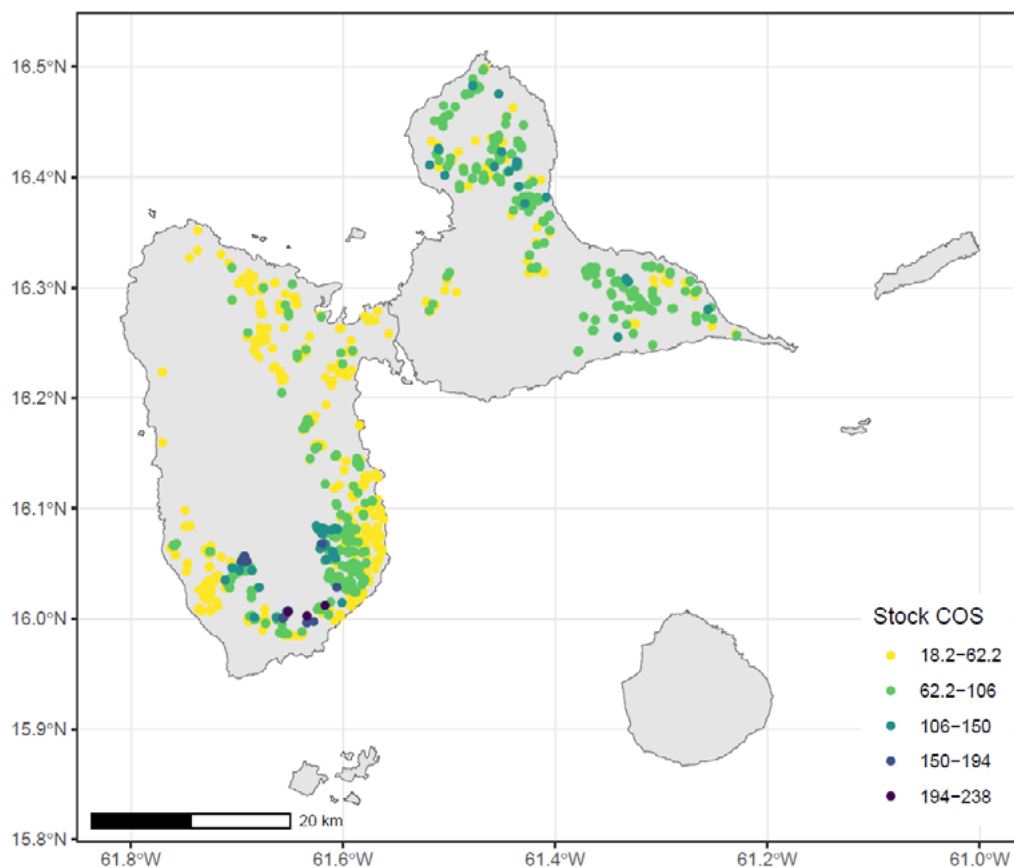
Que ce soit sur le développement de l'agroforesterie, de l'agro-sylvopastoralisme, du travail du sol réduit ou de l'usage d'amendements organiques, un levier important à activer réside dans la formation aux pratiques agroécologiques, à travers la formation professionnelle, l'information et le conseil au niveau des organisations de producteurs, mais aussi au niveau de l'enseignement agricole initial.

Carte des stocks de carbone en Guadeloupe (couche 0-25 cm), exprimés en tonnes C/ha.
Source : BDD TropEmiss & CaribAgro, R. Rochette, D. David et J Sierra et al. (2019).

Faisabilité de l'objectif « 4 pour 1000 » en Guadeloupe



Les sols de Guadeloupe sont relativement riches en matière organique et les taux annuels de minéralisation varient entre 2,5% et 4,5% en fonction du pédoclimat et du système de culture considéré. Cela implique que le carbone du sol possède une dynamique plus rapide que sous climat tempéré. Dans ce contexte, alors que le maintien des stocks carbonés est possible sous les cultures d'exportation et sous prairie, mais problématique sous les cultures annuelles et dans les sols les plus riches (andosols et vertisols), une séquestration de carbone à hauteur de 4 %/an serait difficile à atteindre actuellement au niveau de l'ensemble du territoire. Pourtant, cet objectif d'accroissement annuel (0,4 %/an) pourrait être envisagé moyennant le changement des pratiques et des systèmes de culture. Dans ce sens, tandis que seulement 18% de la SAU pourrait être concernée par une telle augmentation avec les pratiques actuelles, il pourrait être atteint sur 31% de la SAU en appliquant une réduction des labours et en utilisant davantage les amendements organiques (composts, fumiers, etc.).





Présentation du territoire

Contexte biophysique

La Martinique est une île volcanique ayant une position centrale dans l'Arc des Petites Antilles, entre la Dominique au nord et Sainte-Lucie au sud. Sa superficie est de 1 128 km². Deux régions peuvent être distinguées par leur relief : le nord de l'île est montagneux, avec des sommets volcaniques dépassant les 1 000 m (la Montagne Pelée est le point culminant avec 1 397 m), tandis que le sud de l'île est moins accidenté (Figure 34). La géologie de la Martinique est exclusivement volcanique, avec les ensembles volcaniques les plus âgés dans le sud de l'île (entre 24 et 6,5 millions d'années), tandis que le volcanisme du nord de l'île est plus récent.

Le climat de la Martinique est tropical, avec des températures moyennes mensuelles comprises entre 25°C et 28°C. Les précipitations annuelles sont comprises entre 1 000 et 6 000 mm, avec une distribution qui dépend du relief et de l'exposition aux vents dominants. Le nord de l'île, montagneux, est très arrosé, en particulier les reliefs les plus hauts, tandis que le sud de l'île est plus sec, avec des précipitations inférieures à 2 000 mm. Une saison sèche et un peu plus fraîche entre janvier et mai se distingue d'une saison plus humide le reste de l'année.

La distribution spatiale des sols à la Martinique résulte de la combinaison des conditions orographiques, climatiques, et géologiques rencontrées sur l'île (Figure 35). La quasi-totalité des sols de la Martinique sont développés à partir de roches volcaniques. L'âge des dépôts (et donc des sols) ainsi que la pluviosité, elle-même influencée par le relief de l'île, conditionnent l'intensité de l'altération et donc la formation des minéraux secondaires lors de la pédogénèse. Des sols à allophanes (Andosols sur tuf, sur cendres et les sols jeunes) couvrent le nord de l'île, où les matériaux volcaniques sont jeunes et issus du volcanisme, et où la pluviométrie est importante (>3 000 mm/an). Les sols brun-rouille à halloysite (Nitisols) sont présents dans la moitié nord de l'île, qui reçoit des précipitations annuelles comprises entre 1 300 et 2 500 mm/an. Les Ferralsols (à kaolinite ou halloysite) sont présents au centre de l'île, et se sont développés sur des formations volcaniques anciennes, dans des zones où la pluviosité est

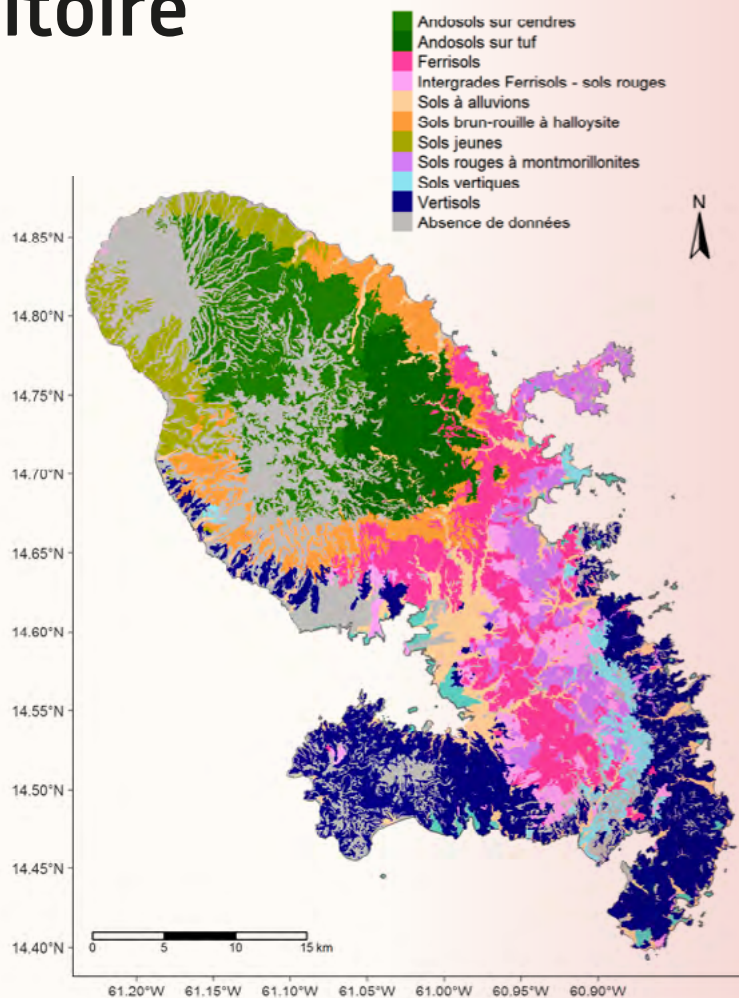


Figure 35 - Carte des sols de la Martinique, d'après Colmet-Daage et al. (1969) ; numérisation des données par Blanchart et Bernoux (2005)

comprise entre 1 600 et 2 300 mm/an. Les Vertisols et sols vertiques magnésio-sodiques occupent le sud de l'île, où les précipitations ne dépassent pas les 1 300 mm/an et où la saison sèche est marquée. Ils sont riches en montmorillonite. Les sols rouges à montmorillonite sont des sols dont le développement pédogénétique est intermédiaire entre celui des Ferralsols et celui des Vertisols, et on les retrouve donc entre ces deux ensembles.



Paysage forestier et volcanique de la Martinique (crédit photo : LJ)

Le biome dominant à la Martinique est la forêt, dont les formes varient selon l'altitude et le climat. La forêt est ainsi humide et dense dans les régions montagneuses d'altitude, tandis que la forêt sèche basse ou haute occupe le sud de l'île et les régions moins arrosées. Le sud de l'île est également occupé par des savanes sèches ou humides selon le climat. Les surfaces agricoles représentent 26 % du territoire en 2017 (Agreste (2021)). Les modes d'occupation des sols les plus représentés à la Martinique sont les prairies, les cultures pérennes de banane et canne à sucre, ainsi que les jachères rotationnelles. Les régions les plus agricoles de la Martinique sont situées sur la façade atlantique au nord-est de l'île, et au sud-ouest (Mantran et al. (2017)). Les cultures industrielles de banane et canne sont principalement présentes sur la façade Atlantique et dans le centre de l'île ; elles occupent les surfaces les plus propices à la mécanisation. Les prairies sont surtout présentes dans le sud, plus sec et où les ressources hydriques pour l'irrigation sont donc plus limitées. Les cultures maraîchères et vivrières se retrouvent dans l'ensemble de l'île sur des petites surfaces.

Contexte agricole

Comme le montre la Figure 36, les surfaces agricoles et le nombre d'exploitations déclinent régulièrement en Martinique. En 2018, la DAAF recensait 2 700 exploitations agricoles (Agreste Martinique (2019)). Cette baisse du nombre d'exploitations s'est traduite par une augmentation de la SAU moyenne des exploitations, passant de 2,2 ha en 1980 à 8,2 ha en 2020. Ce phénomène se rencontre de façon similaire à la Guadeloupe, mais est plus marqué en Martinique. S'agissant de la structure des exploitations (Agreste Martinique (2019)), on constate qu'elle est fortement concentrée et inégalitaire. Selon une note commentée de la DAAF produite en 2012, en Martinique, 70 % des exploitants ont moins de 5 ha et représentent 20 % de la SAU. La classe entre 2 et 5 ha représente près de 50 % des exploitations et 17 % de la SAU totale (Agreste Martinique (2019)). Les exploitations de 20 ha et plus représentent, quant à elles, 54 % de la SAU, mais seulement 6,4 % des exploitations. 3 % des exploitants possèdent presque 40 % de la SAU totale. La disponibilité foncière moyenne par exploitation est de 8,59 ha, rendant difficile leur mécanisation.

Le Tableau 9 montre que les surfaces en banane export et en canne à sucre représentent à elles seules 45 % de la SAU. Ce pourcentage dépasse les 50 % si l'on y ajoute la surface en jachère, essentiellement liée au système de culture de la banane. 10 % de la SAU est consacrée à la production de légumes et de fruits (hors banane) et 38 % aux cultures fourragères et surfaces en herbe.

Ces usages évoluent relativement peu sur les 10 dernières années ; outre la baisse globale de la SAU (-3000ha en 10 ans, soit -300 ha/an), on n'observe que peu de changements d'usages agricoles au sein de la SAU. On peut supposer que l'amplification de la crise « chlordécone », avec la progression des connaissances sur ce problème et les contraintes de cultures qui en ont découlé, sont à l'origine d'une partie de cette baisse de la SAU. L'artificialisation des sols, dans un contexte insulaire où la demande en foncier est en tension, est certainement une autre raison à cette situation.

Comme pour les cultures, on observe une baisse généralisée des volumes de productions animales (Tableau 10). Parmi les ruminants, la majorité de l'élevage est représentée par des bovins et des ovins. Les porcins, principalement élevés en stabulation, ainsi que les volailles, représentent le reste du cheptel.

Le Tableau 11 montre la répartition des surfaces de forêts en Martinique, par type de formation forestière et nature foncière (publique ou privée). Les forêts représentent en tout près de 50 000 ha, soit près de 40% de la surface du territoire, et leur protection constitue donc à ce titre en enjeu important en matière de stockage de carbone. Le secteur privé est majoritaire dans la détention du foncier forestier, il conviendra donc de suivre avec attention les dynamiques d'usages sur cet espace.

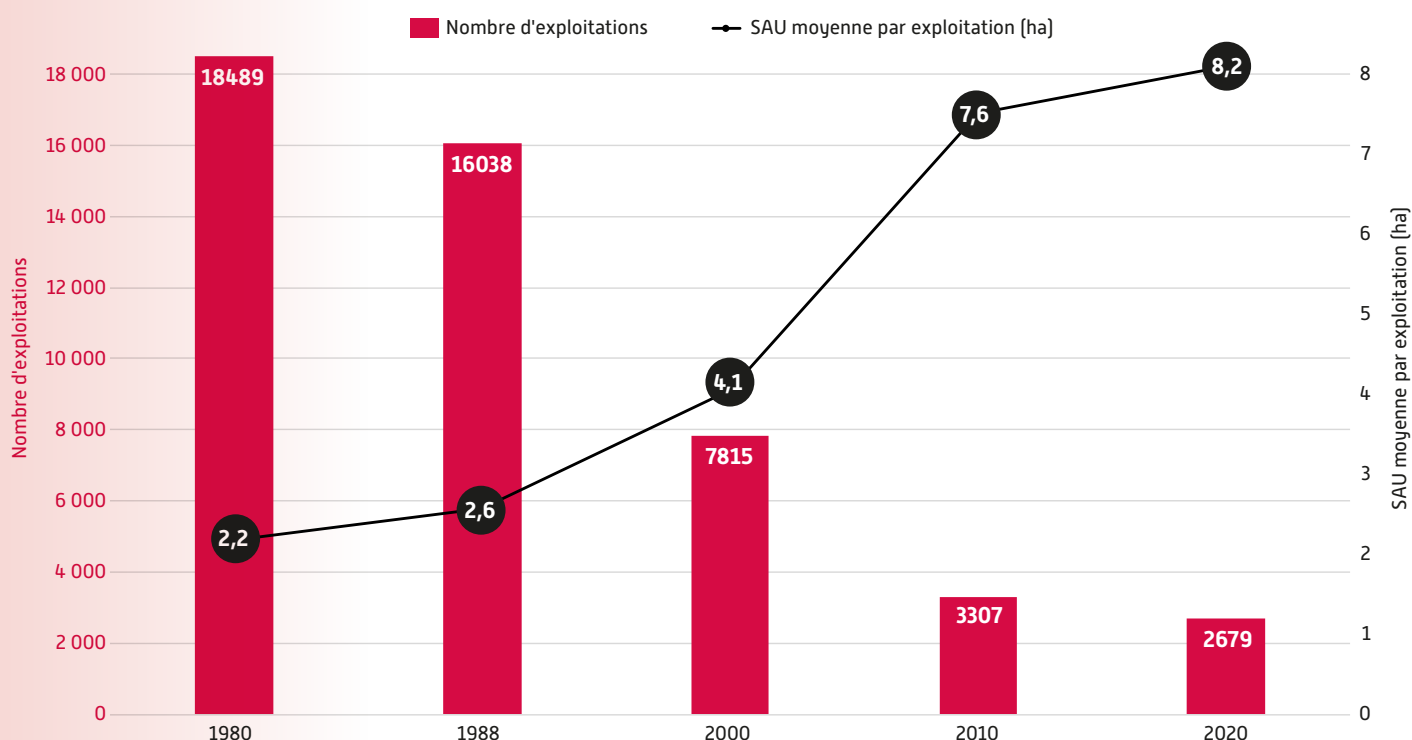


Figure 36 - Evolution de la SAU et de la taille moyenne des exploitations agricoles en Martinique.
Source : Mémento de la Statistique Agricole, DAAF972, 2021.

Surfaces en hectares	2010	2020	Evolution 2020/2010
Canne à sucre	4 070	4 033	-1%
Banane	6 396	5 570	-13%
Fruits (hors banane)	953	1 164	22%
Patates douces, ignames et autres tubercules	661	448	-32%
Légumes frais	1 940	1 122	-42%
Plantes aromatiques, médicinales et à parfum	112	64	-43%
Surface toujours en herbe (prairies, etc.)	8 592	7 517	-13%
Fleurs et plantes ornementales	146	81	-45%
Jardin et verger familiaux des exploitations agricoles	10	10	0%
Pépinières	7	35	400%
Jachères	2 065	1 787	-13%
Autres surfaces (semences, fourrages annuels, etc.)	30	63	110%
Surface agricole utilisée (SAU)	24 982	21 894	-12%

Tableau 9 - Usages des sols agricoles en Martinique et évolution entre 2010 et 2020. Source : Recensements généraux agricoles 2010 et 2020.

Effectifs des cheptels	2010	2020	Evolution 2020/2010
Bovins	18 031	14 515	-19%
Dont vaches laitières	244	117	-52%
Dont vaches nourrices	6 794	5 973	-12%
Porcins	11 597	8 956	-23%
Dont reproducteurs de 50 kg et +	1 073	240	-78%
Caprins	5 651	3 380	-40%
Ovins	11 497	7 460	-35%
Volailles	523 681	473 930	-10%
Dont poules pondeuses, poulettes	257 011	223 260	-13%
Dont poulets de chair	266 670	250 670	-6%

Tableau 10 - Les effectifs des cheptels en Martinique et évolution entre 2010 et 2020. Source : Recensements généraux agricoles 2010 et 2020.

Type de formation forestière	Forêts privées (en milliers d'ha)	Forêts publiques (en milliers d'ha)
Forêts humides (et moyennement humides)	13,9	8,5
Forêts hautes sèches	9,5	0,8
Forêts basses sèches	7,4	1,1
Bambous	1,8	0,1
Mahogany	0,7	1,7
Forêts semi-arborées d'altitude	0	0,9
Mangroves	0	2
Forêts de plage	0	0,1

Tableau 11 - Les surfaces de forêts publiques et privées par type de formation forestière. Source : Mémento de la Statistique Agricole, DAAF972, 2021.

Un contexte socio-économique et démographique en mutation

La Martinique compte près de 360 000 habitants, ce qui entraîne une forte densité de population (355 habitants/km²), mais on assiste à une baisse annuelle de 0,8 % de sa population depuis 2012. La Martinique n'a pas été épargnée par une urbanisation massive, rapide et concentrée.

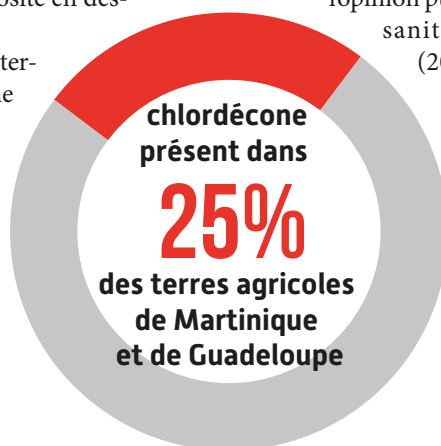
En 2019, malgré le changement de dénomination des espaces, ces écarts se sont affirmés avec 20 % de la surface totale artificialisée, 40 % dédiés aux bois et forêts et 19 % aux terres arables (Agreste Martinique (2019)). La faiblesse de la SAU en Martinique explique que la superficie agricole par habitant du territoire ne soit que de 6 ares. La production agricole présente une grande sensibilité aux conditions climatiques ; l'année 2021 est la 4^{ème} année consécutive avec une pluviosité en dessous des normales attendues.

Comme le soulignent Marzin et al. (2021), la tertiarisation de l'économie martiniquaise est une tendance observée depuis de nombreuses années (développement des activités touristiques et de services). Toutefois, même si elle contribue à moins de 5 % du PIB,

l'agriculture occupe une place relativement importante en termes d'exportation (15 % des exportations totales de biens et services), et de ce fait de création et de circulation de richesses.

Les consommateurs sont de plus en plus demandeurs de produits issus d'une agriculture plus raisonnée, notamment, pour un usage moindre de pesticides. Le cas du chlordécone utilisé dans les bananeraies contre le charençon de 1972 à 1993 est particulièrement ancré dans les esprits. La molécule organochlorée reconnue comme cancérigène probable est présente dans 25 % des terres agricoles de Martinique et de Guadeloupe pour des durées de 60 ans à plusieurs siècles (Cabidoche et al. (2009)). La (re)découverte de la toxicité de ce pesticide a fortement secoué

l'opinion publique ; en 2007, le dossier provoque une crise sanitaire nationale (Torny (2010), Ferdinand (2015)). Les services de l'Etat et le Parc Naturel Régional de la Martinique ont annoncé la mise en place d'un label « zéro chlordécone » en 2018 afin de redonner confiance dans les produits locaux (Parc Naturel Régional de la Martinique (2018)).



Paysage agricole et forestier de la Martinique (crédit photo : L. Jacob)



Stocks de carbone dans les sols et principaux déterminants

Stocks de carbone du sol selon le type de sol

Les stocks de carbone du sol varient à la Martinique selon le type de sol, mais une hétérogénéité importante subsiste au sein de chaque type de sol (Figure 37). Les stocks de carbone les plus élevés sont rencontrés dans les Andosols, formés sur tuf et sur cendres (74 et 76 tC/ha respectivement), tandis que les stocks les plus faibles concernent les sols jeunes développés sur les dépôts volcaniques très récents, et les sols brun-rouille à halloysite. Les sols rouges à montmorillonite sont les sols non allophaniques qui présentent les stocks de carbone les plus importants, avec 62 tC/ha. Les Ferralsols et Vertisols, principaux sols agricoles de l'île, présentent des valeurs intermédiaires, respectivement de 58 et 53 tC/ha en moyenne.

Cette variabilité des stocks de carbone selon le type de sol s'explique par la minéralogie des sols. Les Andosols sont riches en allophanes, qui contribuent à la stabilisation de la matière organique selon différents mécanismes dont la formation de complexes métal-humus-argiles (Boudot (1992) ; Boudot et al. (1986) ; Huygens et al. (2005)), des pH potentiellement acides et une forte teneur en eau avec une faible accessibilité aux micro-organismes des substrats organiques inclus au sein d'un réseau poral complexe constitué d'agrégats d'allophanes (Chevallier et al. (2010)). De fortes corrélations ont été décrites entre stocks de carbone et teneur en allophanes des Andosols (Allo (2019) ; Chevallier et al. (2019)). Les sols brun-rouille (ou Nitisols) contiennent de l'halloysite, un minéral argileux de type 1/1 possédant de faibles capacités d'adsorption de la matière organique, contrairement aux argiles de type 2/1, ce qui explique les stocks de carbone peu élevés rencontrés dans ces sols.

Les Ferralsols, eux aussi riches en argiles de type 1/1, sont cependant plus riches en carbone que les sols brun-rouille. Cette différence entre Nitisols et Ferralsols est difficilement explicable au vu des données disponibles. Les stocks de carbone plus faibles dans les sols vertiques et les Vertisols par rapport aux sols rouges à montmorillonite peuvent s'expliquer par la susceptibilité à l'érosion des Vertisols à la Martinique à la

suite de leur mise en culture, en raison de leur richesse en sodium (Na) et Magnésium (Mg) échangeables (Albrecht et al. (1992b) ; Feller et al. (2001)). Ces sols peuvent donc s'appauvrir en carbone par érosion, contrairement aux sols rouges à montmorillonite et aux Ferralsols. Enfin, les sols jeunes formés sur les dépôts volcaniques récents présentent des stocks de carbone faibles en raison des faibles quantités de minéraux secondaires qu'ils contiennent, ce qui leur confère de faibles capacités d'adsorption et de stabilisation de la matière organique.

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

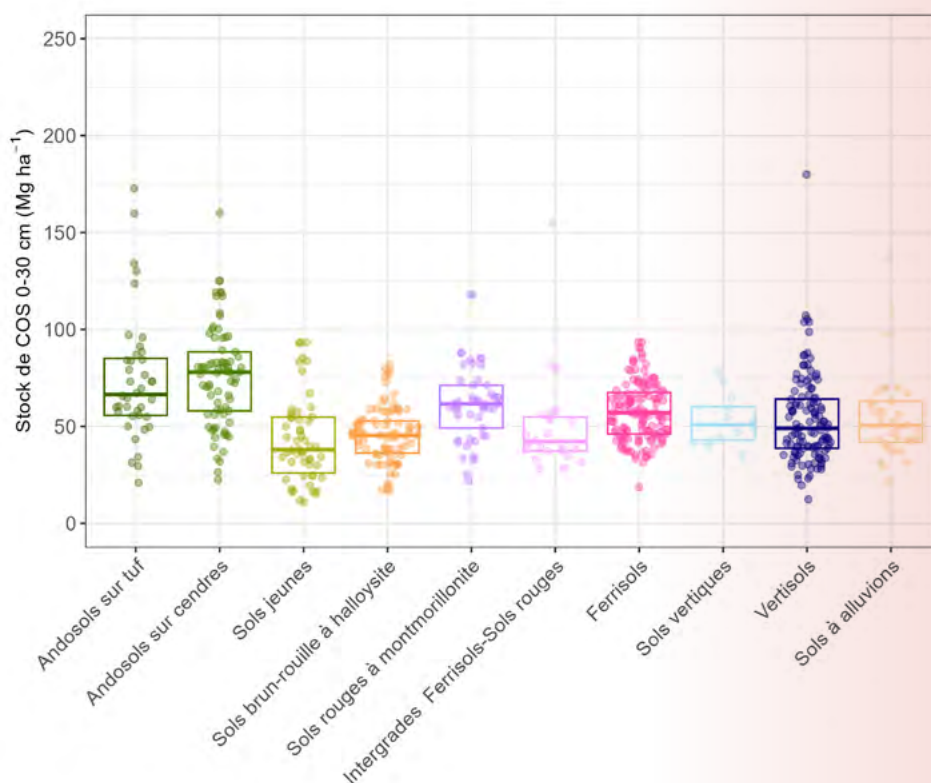


Figure 37 - Distribution des stocks de carbone dans la couche 0-30 cm selon le type de sol à la Martinique. [Blanchart et Bernoux, (2005)].

Stocks de carbone du sol selon la teneur en argile

Il existe une relation faiblement positive entre les stocks de carbone et la teneur en argile dans la couche 0-30 cm ($r=0.24$, $p < 0.05$). Cependant cette relation semble peu évidente pour les sols avec une teneur en argile inférieure à 50%. Cette même relation décomposée par type de sol met en évidence l'absence de relation positive entre teneur en argile et stocks de carbone sur certains sols, tels que les sols brun-rouille à halloysite, les Ferralsols et les sols vertiques (Figure 38).

A l'inverse, il existe une relation positive et linéaire entre la teneur en argile et les stocks de carbone pour les sols rouges à montmorillonite, les Vertisols et les sols à alluvions. La relation entre stocks de carbone et teneur en argile ne serait donc valide que pour certains sols à argile 2/1 (sols rouges à montmorillonite et Vertisols). L'absence de relation entre stocks de carbone et teneur en argile dans les sols à allophanes peut s'expliquer par les difficultés méthodologiques de la mesure de teneur en argile dans ces sols, difficiles à disperser et sujets à des changements de structure lorsqu'ils sont séchés en laboratoire (Bartoli and Burtin (2007)).

De nombreux travaux ont décrit les relations positives entre teneur en particules fines et teneur en carbone, pour les sols à argile 2/1 et 1/1 (Feller and Beare (1997) ; Fujisaki et al. (2018) ; Quesada et al. (2020) ; Zinn et al. (2007)), qui sont expliquées par l'augmentation des capacités d'adsorption de la matière organique lorsque la teneur en argile ou particules fines augmente dans les sols.

Cependant, des travaux récents ont montré que la teneur en argile ou particules fines n'avait pas d'effet sur les teneurs en carbone à l'échelle régionale. A Porto-Rico et dans les Iles Vierges, Vaughan et al. (2019) ont également montré l'absence de relation entre teneur en argile et teneur en carbone dans une population de sols variés (Ferralsols, Cambisols, Kastanozems, Vertisols, Stagnosols). Aux Etats-Unis, Rasmussen et al. (2018) ont mis en évidence l'absence d'effet de la teneur en argile sur les teneurs en carbone pour les sols des climats humides à subhumides : dans ces conditions, les teneurs en oxy-hydroxydes de Fe et Al expliquent mieux la variabilité des teneurs en carbone. L'importance de ces oxyhydroxydes de Fe et Al dans

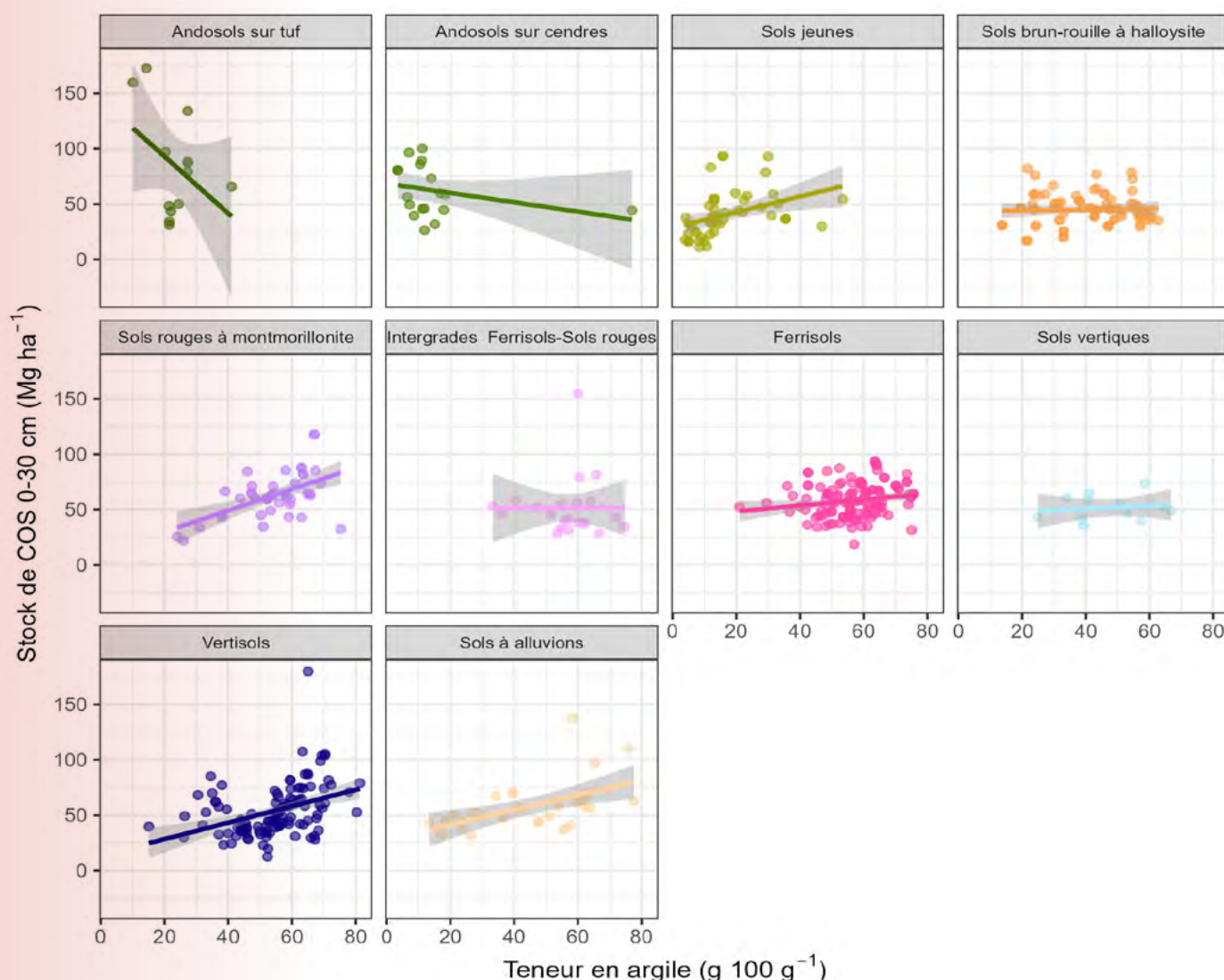


Figure 38 - Stocks de carbone dans la couche 0-30 cm en fonction de la teneur en argile du sol et selon le type de sol à la Martinique. Source : Blanchart et Bernoux (2005) ; Venkatapen (2012). Les teneurs en argile des Andosols ne reflètent probablement pas la distribution granulométrique du sol, les particules $< 2 \mu\text{m}$ y seraient agrégées et constitueraient des pseudo-sables non dispersés au cours de l'analyse.

Stocks de carbone du sol selon l'usage du sol

la stabilisation de la matière organique a également été mise en évidence dans les sols tropicaux à argile 1/1 (Barthès et al. (2008)).

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

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

À l'échelle du territoire, l'usage du sol a un effet sur les stocks de carbone du sol observés, malgré une forte dispersion des données (Figure 39). Les sols sous forêt se distinguent par les stocks de carbone les plus élevés (72 ± 30 tC/ha). Les stocks de carbone les plus faibles se retrouvent dans les sols cultivés en maraîchage (44 ± 13 tC/ha), qui font par ailleurs l'objet d'un travail du sol très fréquent, généralement avant chaque culture, soit plusieurs fois par an. Les prairies présentent des stocks non différents significativement de ceux sous forêt, mais plus élevés que ceux sous maraîchage. Les cultures de banane et canne, fortement représentées dans l'île, présentent des stocks intermédiaires, respectivement de 55 ± 21 et 56 ± 23 tC/ha. Pour ces deux dernières cultures, les travaux du sol avant la mise en place peuvent être très profonds (pouvant aller jusqu'à l'utilisation de tractopelles retournant les 80 premiers centimètres du sol), en partie compensés par de fortes restitutions de biomasse sur la parcelle pendant 4 à 5 ans en moyenne.

Etant donné l'importance du type de sol sur les stocks de carbone, il est pertinent d'analyser les stocks de carbone en croisant mode d'usage et type de sol. On constate cependant que pour certains

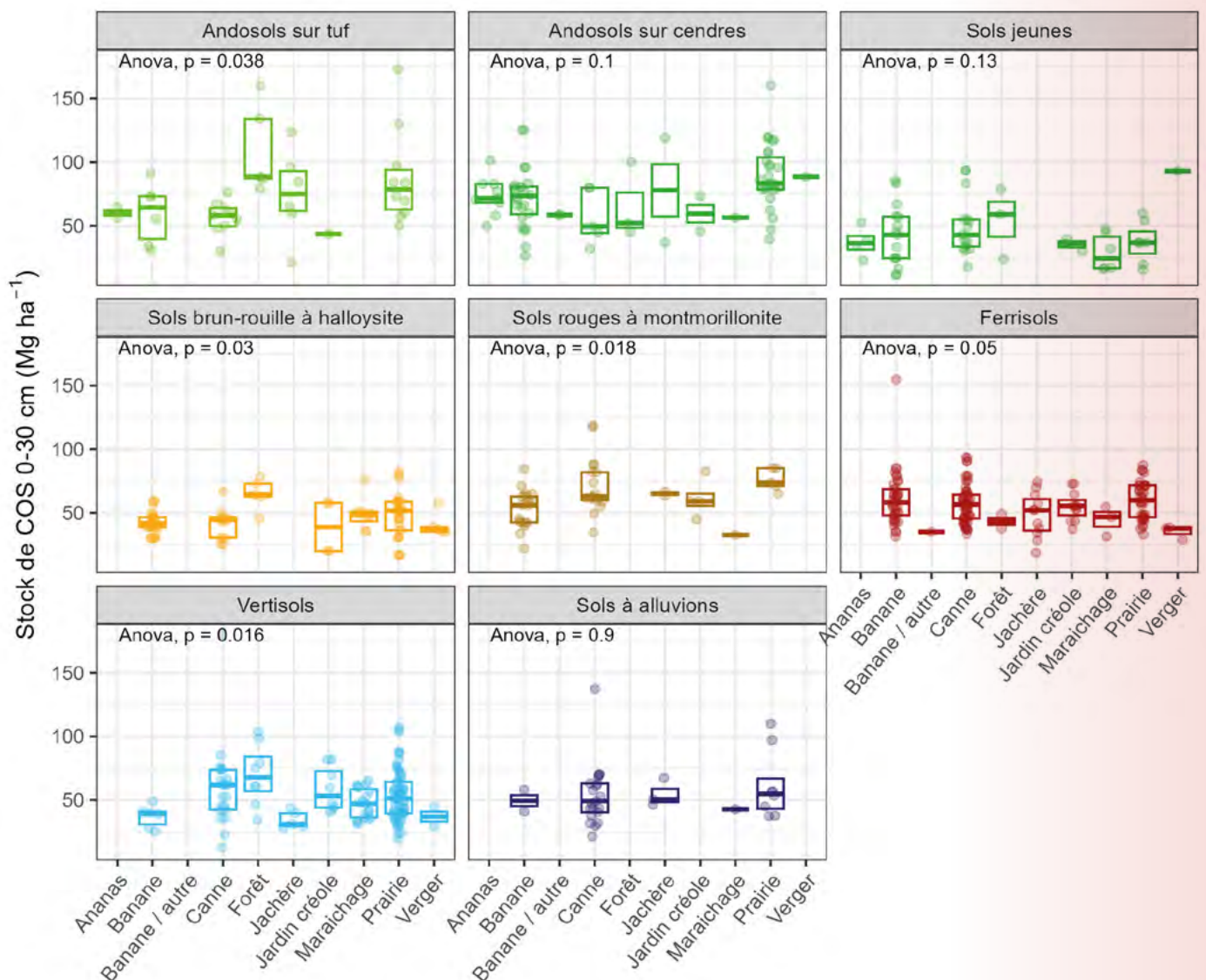


Figure 39 - Stocks de carbone selon l'usage et par grand type de sol à la Martinique. Source : Blanchart et Bernoux [2005] ; Venkatapen [2012].

types de sol, le mode d'usage a un effet non significatif sur les stocks de carbone au seuil de $p=0,05$: c'est le cas des Andosols sur cendres, des Ferralsols, des sols à alluvions et des sols jeunes. En revanche, dans les Andosols sur tuf, les sols brun-rouille à halloysite, les sols rouges à montmorillonite et les Vertisols, le mode d'usage a un effet significatif sur les stocks de carbone du sol.

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

Ces résultats confirment ainsi que les stocks de carbone les plus élevés se retrouvent sous forêt, et que dans certaines situations, les

stocks de carbone sous canne sont plus élevés que sous banane. Cependant, ces résultats soulignent la difficulté à mettre en évidence un effet de l'usage sur les stocks de carbone, étant donné la forte hétérogénéité des stocks de carbone au sein d'un même type de sol et d'un même usage.

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

Effets du changement d'usage des sols sur les stocks de carbone du sol



Quels que soient le type de sol et le type de transition (vers des systèmes pérennes comme la banane ou la canne ou vers des systèmes en maraîchage), la conversion de forêts en systèmes cultivés entraîne une diminution des stocks de carbone comprise entre 22 et 30 tC/ha, représentant entre 24 et 52 % du stock de carbone de référence sous forêt (Tableau 12). Ces diminutions sont fréquemment observées en milieu tropical, en raison des diminutions des entrées de carbone arrivant au sol à la suite de la déforestation, et de l'augmentation de la vitesse de minéralisation de la matière organique à la suite de la mise en culture (Don et al. (2011)).



Ndandou (1998) a étudié l'effet de la conversion d'une prairie pâturée en parcelles de maraîchage (avec deux modalités de travail du sol). Dans cette expérimentation diachronique, les stocks de carbone ont été mesurés 1,5 année après le changement d'usage. En moyenne, les stocks de carbone ont diminué de 16 tC/ha, soit une diminution de 11 % du stock de carbone initial, pour la couche 0- 40 cm (Tableau 13). Les stocks de carbone calculés dans cette étude n'ont pas été exprimés à masse équivalente de sol ; or la densité apparente du sol a diminué à la suite de la conversion des prairies en maraîchage. Si l'on exprimait les stocks de carbone à masse équivalente de sol, la perte de carbone à la suite de la conversion des parcelles en maraîchage serait donc légèrement atténuée, mais ces pertes resteraient néanmoins très importantes. Ces pertes importantes sont à la fois expliquées par des pertes de sols dues à l'érosion, ces Vertisols étant très érodibles, et par la minéralisation

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

Tableau 12 – Effet des transitions de la forêt vers des cultures pérennes et annuelles sur les stocks de carbone à la Martinique. Les différences [%] sont exprimées par rapport au stock de carbone mesuré sous forêt.

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



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

Paysage agricole de la Martinique (crédit photo : L. Jacob)



Les transitions des cultures de canne ou banane vers des cultures maraîchères ou d'ananas ont été étudiées dans quelques situations à la Martinique par le biais de comparaisons de stocks de carbone sur des parcelles adjacentes présentant des caractéristiques pédologiques similaires. Ces transitions entraînent des diminutions de stocks de carbone comprises entre 9 et 36 % du stock de carbone mesuré dans les parcelles témoin (Tableau 14).

Transition	Type de sol	Différence de stock		Prof. sol cm	Référence
		Mg C ha ⁻¹	%		
Prairie vers maraîchage	Vertisols	-16,45	-11,0	0-40	Ndandou [1998]*
	Sols jeunes	-3,0	-15,3	0-30	Venkatapen [2012]
	Nitisols	-11,9	-20,7	0-30	Venkatapen [2012]
	Alluvions	-2,1	-4,7	0-30	Venkatapen [2012]
Prairie vers banane	Nitisols	-21	-33,9	0-30	Venkatapen [2012]
Prairie vers canne	Vertisols	-3,4	-4,4	0-30	Venkatapen [2012]

Tableau 13 - Effet des transitions des prairies vers des cultures annuelles et pérennes sur les variations de stocks de carbone à la Martinique. Les différences [%] sont exprimées par rapport au stock de carbone mesuré sous prairie.

Transition	Type de sol	Différence de stock		Prof. sol cm	Référence
		Mg C ha ⁻¹	%		
Canne vers ananas	Sols jeunes	-12,6	-36,0	0-30	Venkatapen [2012]
Banane vers maraîchage	Vertisols	-8,2	-22,6	0-30	Venkatapen [2012]
Canne/Banane vers maraîchage	Andosols sur tuf	-10,5	-20,0	0-20	Albrecht et al. [1992a]
Banane vers ananas	Sols jeunes	-4,7	-9,0	0-20	Albrecht et al. [1992a]

Tableau 14 - Effet des transitions des cultures pérennes vers des cultures annuelles sur les variations de stocks de carbone à la Martinique. Les différences [%] sont exprimées par rapport au stock de carbone mesuré dans les cultures pérennes.

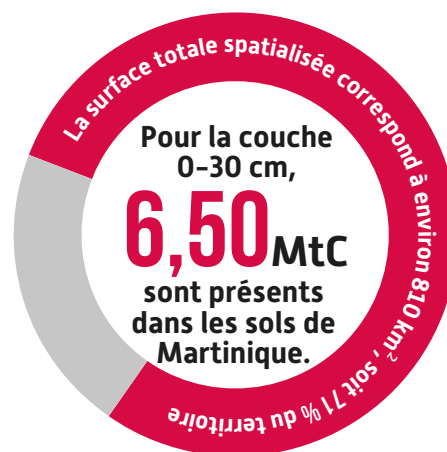
Effet des pratiques sur les stocks de carbone des sols



PRATIQUES DE GESTION DANS LES CULTURES PÉRENNES

L'effet du mode de gestion des résidus de culture dans les cultures de canne à sucre a été étudié par Ripoche (2004). Les stocks de carbone sur deux parcelles situées sur des Ferralsols ont été comparés après 6 années de gestion avec ou sans brûlis des résidus de culture (comparaison synchronique). Le stock de carbone (couche 0-30 cm) dans la parcelle sans brûlis des résidus était de 61 tC/ha, contre 54 tC/ha dans la parcelle où les résidus étaient brûlés. L'absence de brûlis représente une variation positive de 12 % de ce stock. Cette différence de stockage s'explique par de faibles apports de carbone dans les parcelles où les résidus de culture sont brûlés.

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



PRATIQUES DE GESTION DANS LES CULTURES ANNUELLES

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

L'effet du travail du sol dans les cultures maraîchères a été étudié par Ndandou (1998) en utilisant une approche synchronique sur des parcelles de prairie converties en maraîchage, sur des Vertisols. 15 mois après conversion en maraîchage, le stock de carbone dans la modalité avec travail du sol superficiel (10-15 cm) était de 82 tC/ha, contre 71 dans la modalité avec travail du sol profond (30-40 cm). Les deux modalités ont entraîné une baisse des stocks de carbone par rapport à la prairie initiale (93 tC/ha). Comme cela a été mentionné précédemment pour ces travaux, les stocks de carbone n'ont pas été calculés à masse équivalente de sol. Néanmoins, ces travaux montrent que le travail superficiel du sol permet de limiter les pertes de carbone à la suite des conversions prairie-maraîchage. Les pertes de carbone accrues par le travail profond du sol s'expliquent par une augmentation de la minéralisation de la matière organique et par l'augmentation du taux d'érosion.

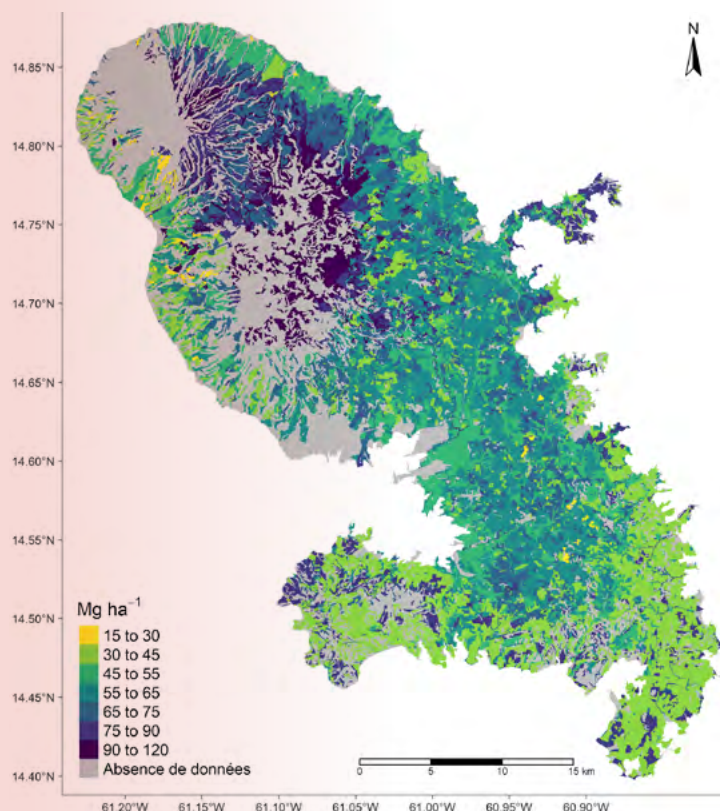


Figure 40 - Carte des stocks de carbone sur la couche 0-30 cm à la Martinique. [Blanchart et Bernoux (2005)].

Spatialisation des stocks de carbone du sol



MÉTHODOLOGIE

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

La variabilité spatiale des stocks de carbone est principalement associée à la distribution spatiale des sols, avec les stocks de carbone les plus élevés dans les régions à Andosols, dans les montagnes du nord de l'île (Figure 40). Les stocks de carbone les plus faibles se retrouvent sur les flancs des montagnes ou à proximité du littoral (sols jeunes formés sur des dépôts volcaniques récents). Les stocks de carbone peu élevés (entre 30 et 45 tC/ha), cartographiés dans le sud-ouest et le sud-est de l'île, correspondent à des zones de savanes sèches sur des Vertisols, dont le stock moyen est évalué à 44 tC/ha.



Paysage de la Martinique (crédit photo : L. Jacob)



STOCKS DE CARBONE TOTAUX À LA MARTINIQUE

Les stocks de carbone totaux peuvent être calculés à partir des stocks de carbone spatialisés. La surface totale spatialisée correspond à environ 810 km², soit 71 % du territoire (Tableau 15). La part de surfaces non couvertes par la spatialisation des stocks de carbone correspond principalement aux zones naturelles sans sols (roches volcaniques nues ou avec une végétation pionnière) et aux zones urbanisées. Pour la couche 0-30 cm, 6,50 MtC sont présents dans les sols de Martinique. En valeur absolue, les sols contenant le plus de carbone sont les Vertisols et les Andosols sur cendres, avec environ un million de tonnes au total pour chacune de ces deux unités de sol.

Type de sol	Superficie en km ²	Stock de C 0-30 cm (10 ⁶ tonnes)
Andosols sur cendres	110,0	0,968
Andosols sur tuf	81,7	0,562
Sols jeunes	47,3	0,228
Sols brun-rouille à halloysite	67,7	0,371
Ferrisols	115,0	0,634
Intergrades Ferrisols - Sols rouges	42,4	0,24
Sols rouges à montmorillonite	59,1	0,371
Sols vertiques	26,4	0,133
Vertisols	192,0	1,000
Absence de sols ou de données	267,6	0
Total	1077,0	6,500

Tableau 15 - Superficie totale et stocks de carbone totaux par type de sol à la Martinique. [Blanchart et Bernoux (2005)].

Déterminants socio-économiques des stocks de carbone du sol

Usages des sols agricoles : état des lieux

Les surfaces agricoles de la Martinique sont dédiées en premier lieu à l'élevage (bovin, ovin) et ensuite à la culture de la banane pour l'exportation. La canne occupe le troisième rang avec 4 000 ha ; elle est destinée à la production de rhum agricole. Les autres cultures représentent environ 3 000 ha, il s'agit de légumes, racines et tubercules destinés au marché local. De la même manière que nous l'avions observé en Guadeloupe, les exploitations martiniquaises sont spécialisées : dans la culture de la banane, la production de légumes, l'élevage ou la canne. Les

exploitations diversifiées sont largement minoritaires, en particulier celles où coexistent agriculture et élevage. Les élevages aussi sont pour la plupart spécialisés.

L'agriculture martiniquaise est donc orientée vers une forte spécialisation des exploitations agricoles, où agriculture et élevage coexistent peu. La contrainte « chlordécone », la nature des systèmes agraires, l'inégale répartition du foncier, en font une agriculture aux spécificités nombreuses.

Vieux cacaoyer Amelonado en Martinique. (crédit photo : P. Lachenaud)



Pratiques agricoles (dé)stockantes : niveau de mise en œuvre

Les différents taux d'adoption des différentes pratiques agricoles étudiées, ayant une influence sur les stocks de carbone du sol, sont présentés dans la Figure 43. L'usage de fertilisants d'origine animale présente un taux proche de 50 %, ce qui, compte tenu de la forte spécialisation des exploitations martiniquaises, laisse présager l'existence de transferts d'effluents entre exploitations du territoire. Cette hypothèse sera à investiguer ultérieurement. L'usage d'amendements avec des fertilisants organiques type compost est un peu en dessous de 10 %. Avec le développement de plusieurs plateformes de compostage de produits résiduels organiques du territoire, on peut supposer que

cette pratique ne peut que se développer à l'avenir. Le labour profond concerne environ un tiers des exploitations, cette pratique étant prédominante dans les cultures de canne à sucre et banane. La réduction du travail du sol (labour réduit ou semis direct) concerne un peu moins de 20 % des exploitations. Avec l'introduction de jachères avec plantes de services en culture de banane puis semis sous couvert végétal vivant, on peut supposer que cette pratique peut également tendre à se développer. Comme en Guadeloupe, l'agroforesterie est minoritaire et concerne moins de 5 % des exploitations.

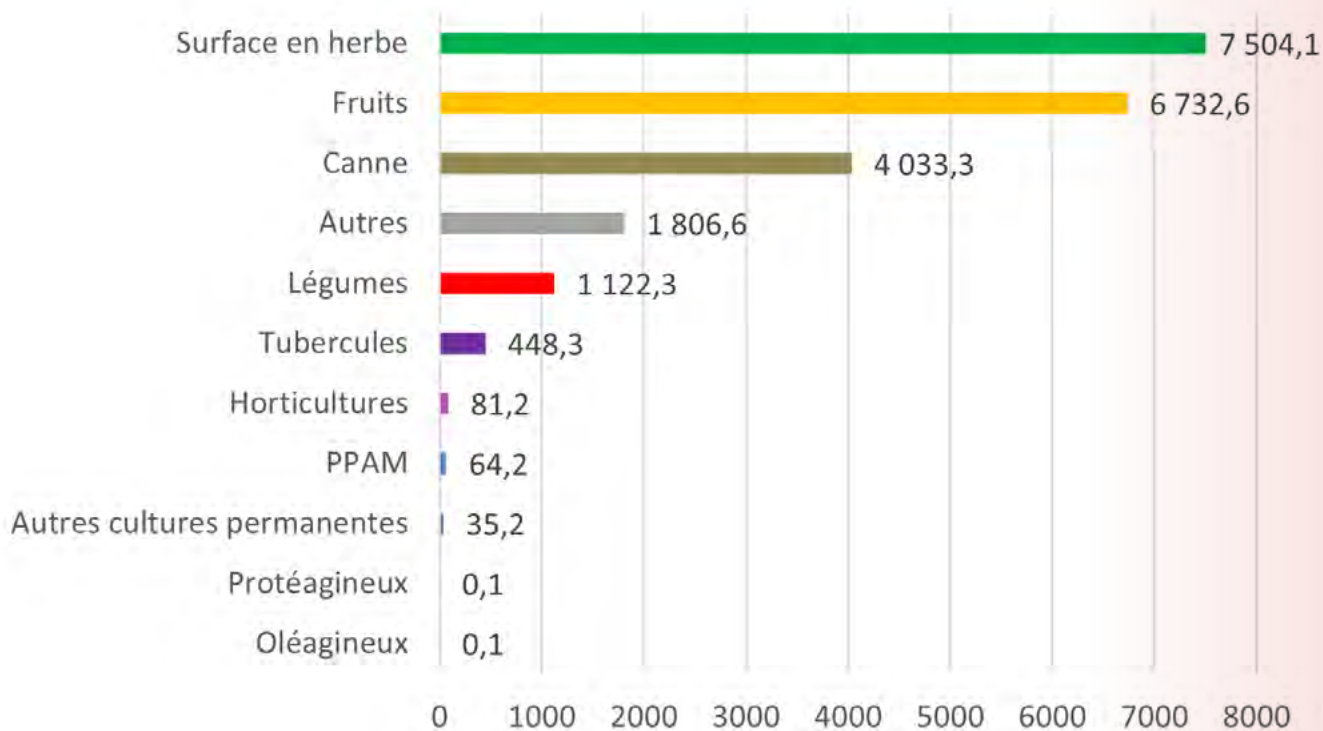


Figure 41 - Usages des surfaces agricoles à la Martinique. Source : Recensement Général Agricole 2020

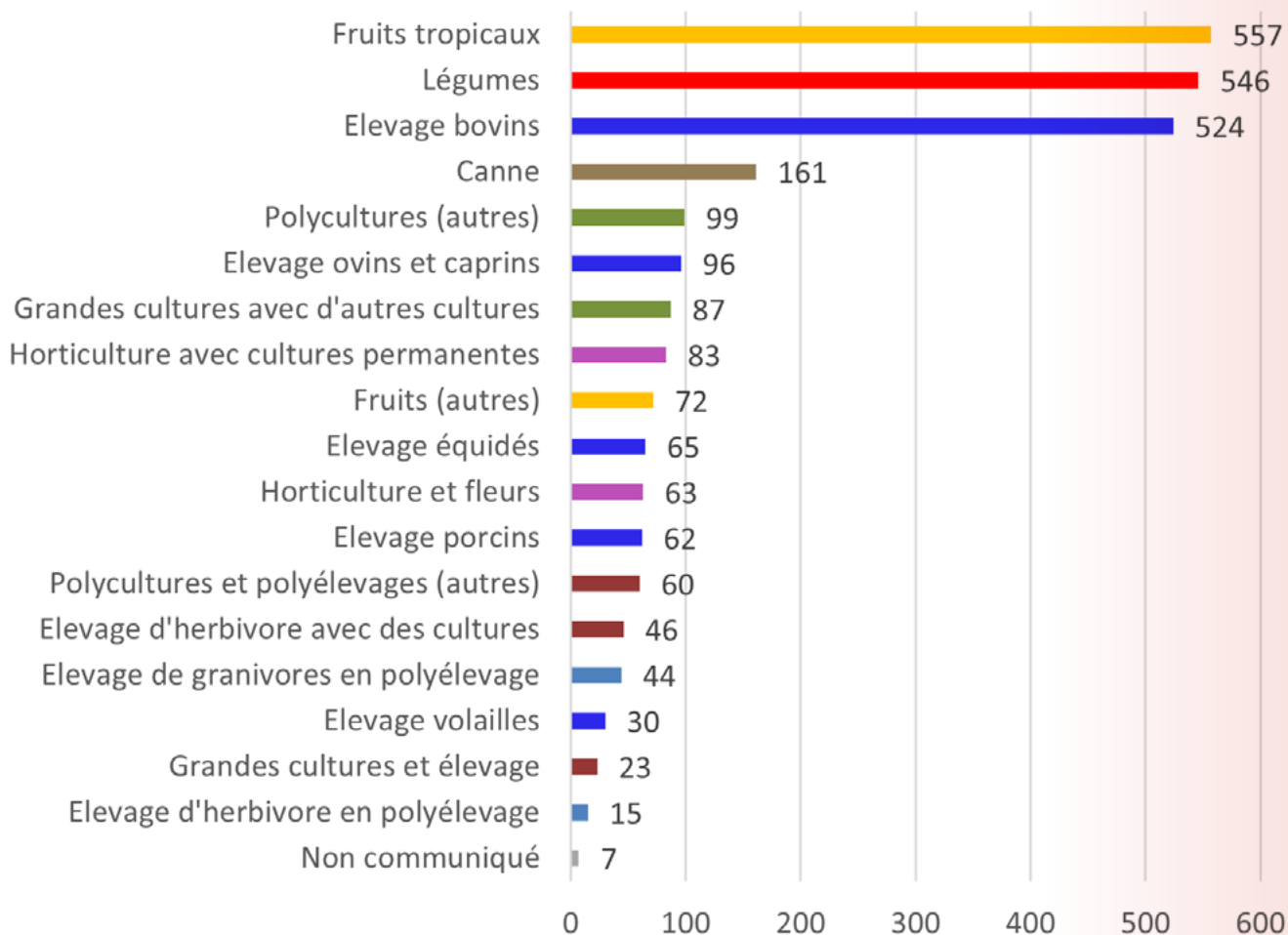


Figure 42 - Orientation productive et spécialisation des exploitations agricoles de Martinique. Chiffres exprimés en nombres d'exploitations. Source : Recensement Général Agricole 2020

Déterminants socio-économiques de l'adoption



AGROFORESTERIE

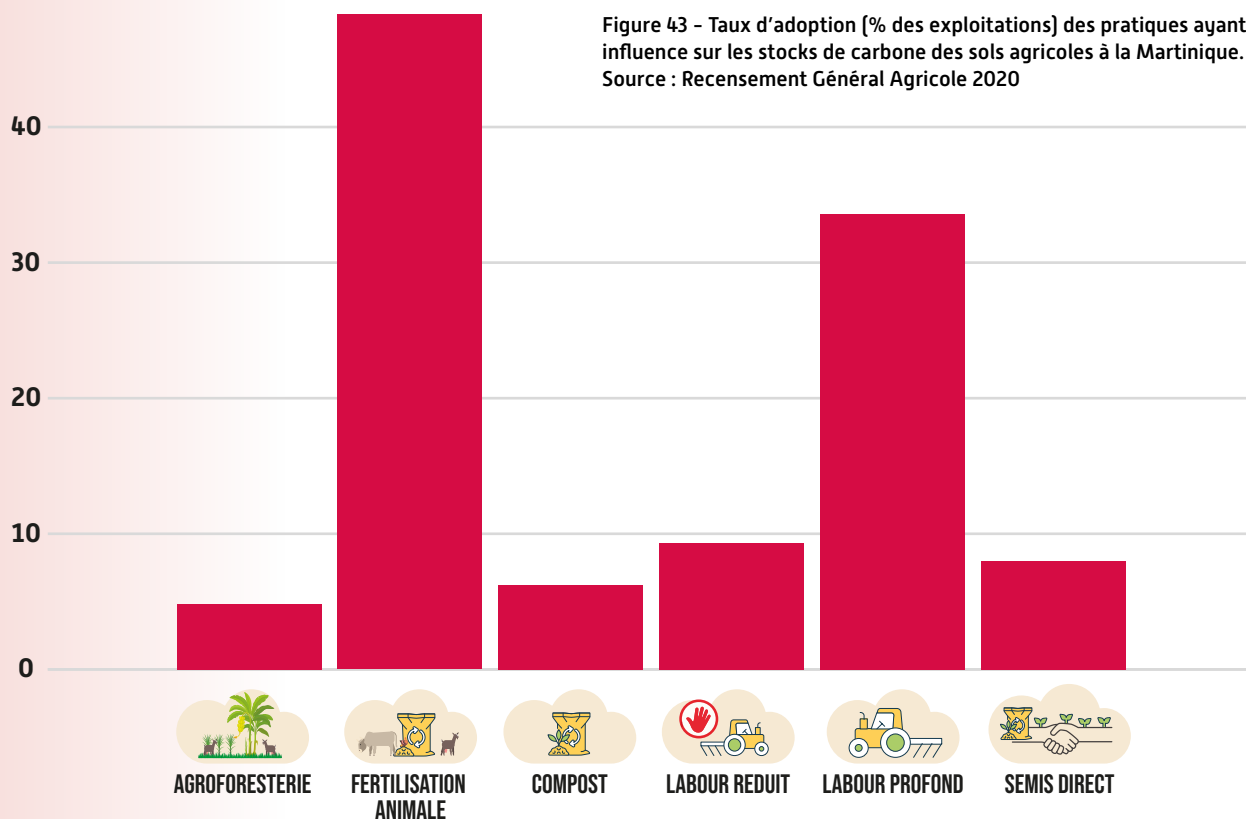
Les résultats des régressions logistiques montrent que la pratique de l'agroforesterie est le fait d'exploitations agricoles spécialisées, avec un système de culture unique (ex : tubercules avec des arbres et de la vanille). Les variables qui influent positivement sur l'adoption de cette pratique sont les suivantes (seuil de 5 %, classées par ordre décroissant d'importance) : le fait que le conjoint soit exploitant agricole, un niveau d'étude élevé, le fait d'être labellisé en Agriculture Biologique, la commercialisation en circuit court. La pratique de l'agroforesterie est sans lien avec la dimension économique.

Zébu brahman à la Martinique. (crédit photo : C. Maillard)



FERTILISATION AVEC EFFLUENTS ANIMAUX

C'est une pratique très courante en Martinique puisque 48,3 % des exploitations la mettent en œuvre, soit près de la moitié des exploitations. L'appartenance à 4 types d'exploitations est significativement favorable à l'usage de fertilisation animale : polyculture et polyélevage, granivores en polyélevage, grandes cultures, élevage d'ovins et caprins. Les autres variables qui influencent positivement l'adoption de cette pratique sont, par ordre d'importance décroissant : être membre d'une CUMA, utiliser la numérisation de la gestion des cultures, pratiquer le labour, avoir un conjoint ayant une profession de catégorie intermédiaire ou supérieure, être une exploitation de très faible dimension économique (PBS inférieure à 2 000 €), commercialiser en circuit court et pratiquer de l'agroforesterie. Le fait que l'exploitation ait une dimension économique élevée (PBS entre 50 000 et 100 000 €) a une influence négative sur l'adoption de cette pratique. En conclusion, cette pratique semble donc concerner des exploitations de petite taille, possédant une activité d'élevage intégrée, avec accès à du matériel via des CUMA, prérequis indispensable pour l'épandage des matières.





FERTILISATION AVEC COMPOST

Le modèle d'adoption de la fertilisation organique avec des Composts est peu significatif. Trois variables seulement ont une influence positive sur cette pratique : la surface de l'exploitation est irrigable, il y a pratique de l'agroforesterie et il y a présence d'une main d'œuvre familiale. Les variables qui influencent négativement l'adoption de cette pratique sont le classement de l'exploitation dans le type « bovins » (ce type privilégiant certainement l'usage d'effluents animaux) et le faible niveau de formation agricole ou d'étude de l'agriculteur. Les déterminants de l'adoption de cette pratique doivent donc être plus relatifs à des variables attitudinales qu'à des déterminants structurels.



LABOUR PROFOND

Pour cette pratique assez courante (un tiers des exploitations), l'appartenance à un type d'exploitation est très déterminante. De façon positive, appartenir au type « polyculture », « légumes », « horticulture », « canne à sucre » et « polyculture + polyélevage » est associé à la pratique du labour profond. De façon logique ce sont les systèmes à dominante culturale qui pratiquent le labour profond à l'inverse de ceux à dominante animale. Les autres variables qui influencent positivement l'adoption de cette pratique sont les suivantes : être double actif, la commercialisation en circuit court, l'usage de la fertilisation minérale et être membre d'une organisation de producteurs non commerciale. Les variables qui influencent négativement l'adoption de cette pratique sont la présence de main d'œuvre familiale puis la pratique de l'agroforesterie. Cette pratique est sans lien avec la dimension économique de l'exploitation, mais semble donc concerner les exploitations de cultures végétales et les exploitants à temps partiel. On peut supposer que le recours à la prestation de service est important dans ces exploitations pour la gestion du foncier agricole.

Pieds de canne à sucre. [crédit photo : L. Jacob]



Récolte de cannes à sucre avant transformation. [crédit photo : L. Jacob]



LABOUR RÉDUIT

Moins d'une exploitation agricole sur dix pratique le labour réduit. Aucun type précis d'exploitation n'adopte plus spécifiquement cette pratique. Les variables qui influencent positivement l'adoption de cette pratique sont, par ordre d'importance décroissant : la pratique de l'agroforesterie et une faible dimension économique. Les facteurs qui ont un effet négatif sur la probabilité d'adoption sont le fait d'être à temps partiel sur l'exploitation et d'avoir recours à du travail saisonnier. Cette pratique, peu fréquente, semble donc intéresser des exploitations économiquement petites à moyennes (PBS entre 4 et 15 000 €), peu intensives, intéressées par deux autres pratiques agroécologiques que sont l'agroforesterie et la fertilisation animale.



SEMIS DIRECT

Le semis direct est pratiqué dans 8 % des exploitations. Trois variables ont une influence positive pour cette pratique : une formation agricole élevée (licence ou plus), la présence de main d'œuvre familiale et le fait d'avoir le bac agricole comme formation agricole.



CONCLUSION

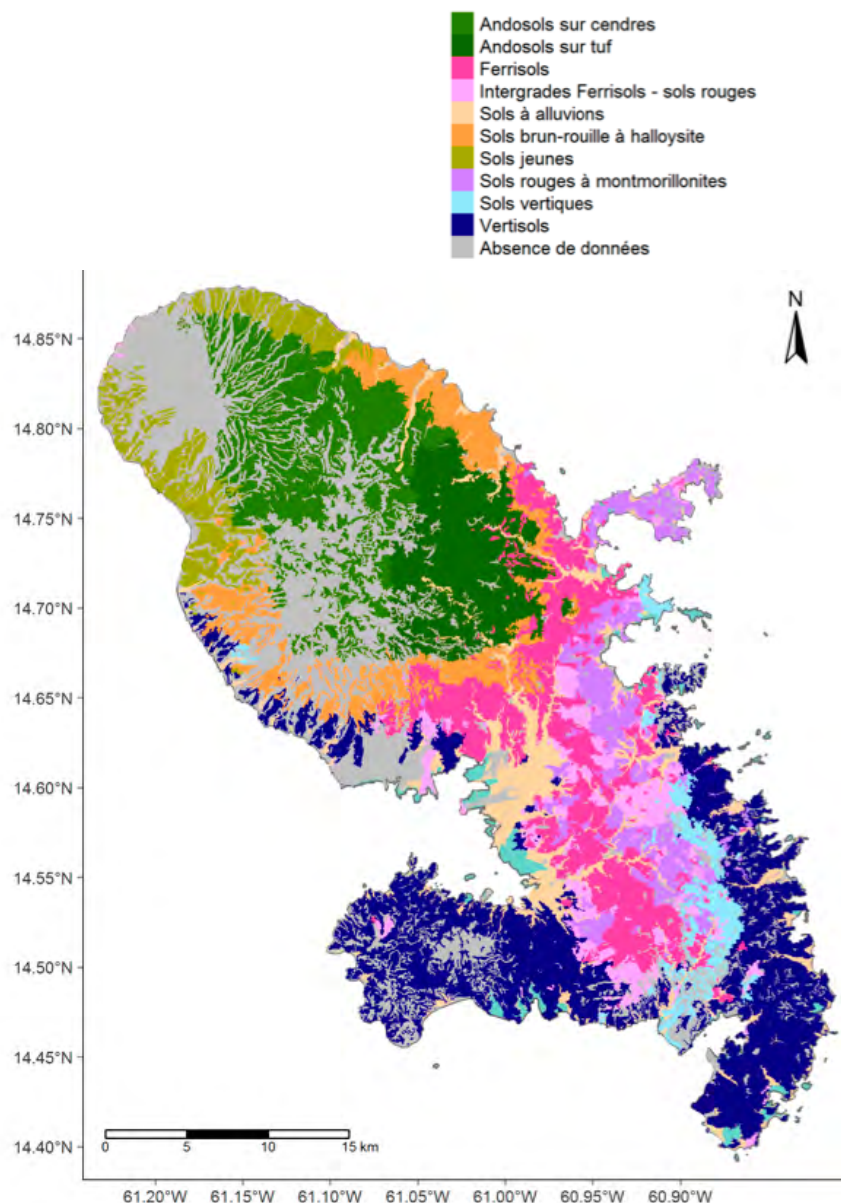
On peut dire que le développement du labour réduit et de l'agroforesterie, de même que la diversification des exploitations, sont des axes de progrès futurs en Martinique. La situation de la Martinique est relativement comparable à celle de la Guadeloupe. Nous proposons dans la section suivante des recommandations communes pour ces deux territoires.

Principaux déterminants des stocks de carbone dans les sols

Les stocks de carbone du sol varient en Martinique selon le type de sol. La quasi-totalité des sols sont développés à partir de roches volcaniques, et leur distribution spatiale résulte de la combinaison des conditions orographiques, climatiques, et géologiques rencontrées sur l'île : Andosols sur tuf ou cendres au nord, en altitude sous climat perhumide, Nitisols dans la moitié nord à climat humide, Ferralsols au centre à climat humide, Vertisols et sols vertiques magnésio-sodiques au sud à climat subhumide, et sols rouges à montmorillonite, intermédiaires entre les Nitisols et les Ferralsols. Les stocks de carbone (couche 0-30 cm) les plus élevés sont rencontrés dans les Andosols (75 tC/ha), suivis par les sols rouges à montmorillonite (62 tC/ha), tandis que les stocks les plus faibles concernent les sols jeunes développés sur les dépôts volcaniques très récents, et les Nitisols (50 tC/ha). Les Ferralsols et Vertisols, principaux sols agricoles de l'île, présentent des valeurs intermédiaires (58 et 53 tC/ha, respectivement).

A l'échelle du territoire, l'usage du sol a un effet important sur les stocks de carbone. Les sols sous forêt et prairie se distinguent par les stocks de carbone les plus élevés (72 tC/ha). Les stocks de carbone les plus faibles se retrouvent dans les sols cultivés en maraîchage (44 tC/ha), qui font par ailleurs l'objet d'un travail du sol très fréquent. Les cultures de banane et canne, fortement représentées dans l'île, présentent des stocks intermédiaires (55 tC/ha). Sur ces deux dernières cultures, les travaux du sol avant la mise en place peuvent être très profonds (pouvant aller jusqu'à l'utilisation de tractopelles retournant les 80 premiers centimètres du sol), en partie compensés par de fortes restitutions de biomasse sur la parcelle pendant 4 à 5 ans en moyenne.

Jeunes pousses de cannes à sucre. (crédit photo : L. Jacob)



Carte des sols de la Martinique (d'après Blanchart et Bernoux, 2005)

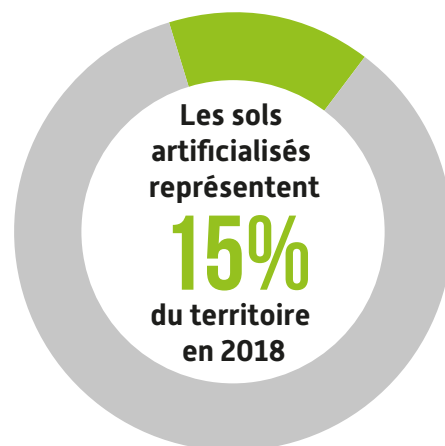
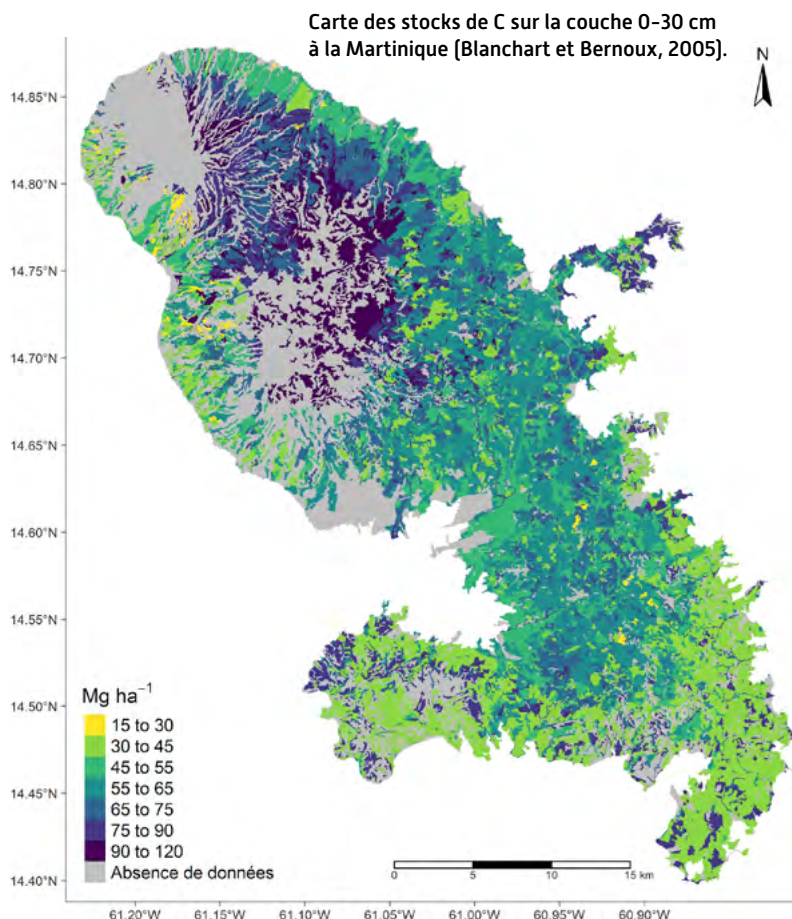
Spatialisation des stocks de carbone du sol

La variabilité spatiale des stocks de carbone est principalement associée à la distribution spatiale des sols, avec les stocks de carbone les plus élevés dans les régions à andosols, dans les montagnes du nord de l'île. Les stocks de carbone les plus faibles se retrouvent sur les flancs des montagnes ou à proximité du littoral (sols jeunes formés sur des dépôts volcaniques récents). Les stocks peu élevés (entre 30 et 45 tC/ha), cartographiés dans le sud-ouest et le sud-est de l'île, correspondent à des zones de savanes sèches sur des vertisols. Les stocks de carbone totaux peuvent être calculés à partir des stocks spatialisés (hors zones naturelles sans sol et zones urbanisées). Pour la couche 0-30 cm, 6,5 MtC sont présents dans les sols de Martinique. Les sols contenant le plus de carbone sont les Vertisols et les Andosols sur cendres, avec environ un million de tonnes au total pour chacune de ces deux unités de sol.

Changements d'usage actuels et futurs à la Martinique : quel effet sur les stocks de carbone ?

Les changements d'usage étudiés à la Martinique ont surtout concerné des conversions de surfaces occupées par une végétation naturelle (forêts, savanes herbueuses, prairies) vers des usages agricoles. Ces transitions ont conduit à des pertes de carbone plus ou moins importantes selon les types de sol. Or ce type de transition est désormais rare. En revanche, les changements d'occupation plus récents concernent différents modes d'occupation agricoles (systèmes cultureux complexes vers bananeraies, bananeraies vers prairies, canne à sucre vers bananeraies), pour lesquels peu de données sur les stocks de carbone ont été acquises. Il est également important de noter l'importance de l'artificialisation des sols dans les dynamiques de changements de mode d'occupation. Les sols artificialisés représentent à la Martinique 15% du territoire en 2018, contre en moyenne 9% en France métropolitaine. L'effet de l'artificialisation des sols sur les stocks de carbone n'est pas documenté à la Martinique ni dans les autres territoires d'Outre-mer, alors qu'elle est un des changements à documenter dans les PCAET.

Une possibilité d'évolution des changements d'usage des sols de la Martinique serait le développement de surfaces agricoles destinées à l'alimentation locale, notamment les cultures fruitières et légumières. Si ces cultures se développent au dépend des cultures d'exportation, telles que la canne et la banane, une diminution de stocks de carbone associée à ces changements d'usage pourrait être attendue. Cela est particulièrement important car actuellement il existe un regain d'intérêt pour le développement de la « petite agriculture familiale », qui concerne des petites exploitations caractérisées par une forte diversification des productions. Ces systèmes, de par leur diversification, offriraient une meilleure résilience face aux aléas climatiques que les monocultures de canne et banane, et leur développement contribuerait à alimenter le marché local.



Enjeux et pistes de réflexion sur le stockage de carbone dans les sols de Martinique

Les enjeux de maintien voire d'augmentation des stocks de carbone se situeraient au niveau des systèmes de cultures maraîchères et vivrières, dont le développement pourrait être encouragé ces prochaines décennies, et dont l'implantation aux dépens de prairies ou de cultures pluriannuelles entraînerait une diminution des stocks de carbone, lorsque les systèmes sont gérés de manière conventionnelle. Une pratique influençant les stocks de carbone dans les systèmes maraîchers, identifiée à la Martinique, est le travail du sol (profondeur et fréquence), avec une diminution des stocks de carbone accrue lorsque le sol est travaillé en profondeur. Revenir sur ce type de pratique est essentiel afin d'assurer la durabilité de la ressource sol. Similairement, le mode d'intensification des systèmes maraîchers, déterminé par la durée des jachères entre les cultures, est, au vu des données disponibles, une variable insuffisamment quantifiée, dont l'évaluation est nécessaire pour améliorer la performance agronomique de ce type de diversification.

Au vu des stocks importants que présentent les prairies fertilisées en Martinique, un mode de gestion durable vis-à-vis du carbone serait la mise en place de rotations « cultures maraîchères / prairies ». Il est indéniable que cette pratique nécessite une vision dans le temps long (ex. : rotations sur 10 ans) et un changement dans les modalités de gestion de l'élevage, qui est souvent spécialisé. Ce dernier aspect est aussi valable pour l'agroforesterie et le sylvo-pastoralisme : ces systèmes sont très efficaces en termes de séquestration de carbone mais nécessitent des investissements (financiers et humains) de long terme, et une technicité accrue par rapport aux systèmes actuels. Faciliter l'accès au foncier et aux préfinancements des investissements pour l'installation de jeunes agriculteurs, pourrait permettre de développer ces systèmes plus intégrés, à développer en cohérence avec une stratégie de valorisation labellisée sur le marché local dans le cadre de circuits courts.

Enjeux et pistes de réflexion pour la Guadeloupe et la Martinique

Compte tenu de la proximité des contextes agropédoclimatiques et socio-économiques de la Guadeloupe et de la Martinique, et du niveau similaire des connaissances acquises sur le fonctionnement des sols et le stockage du carbone, dans cette section nous traiterons conjointement ces deux territoires. Nous nous attacherons pourtant à les distinguer quand cela sera pertinent à cause de différences de type biophysique ou socio-économique.

Une agriculture duale

Comme le notent Marzin et al. (2021), l'agriculture guadeloupéenne, et antillaise en générale, est multiforme mais présente un certain dualisme avec deux principales formes de production. De manière caricaturale, on observe d'un côté des exploitations formelles de grandes superficies (au regard de la surface moyenne des exploitations en Guadeloupe qui est de 4 hectares), fondées sur la production de monocultures pour l'exportation et l'utilisation de main d'œuvre salariée, qui dominent le secteur agricole en termes de volumes produits, de surfaces occupées, de création de richesse, d'accès aux aides publiques. De l'autre, des exploitations de petites surfaces, dédiées à des productions dites de diversification (racines, tubercules, bananes plantain, maraîchage, fruits, élevage), qui sont numériquement importantes, parfois informelles, utilisent une main d'œuvre familiale, et sont historiquement marginalisées et largement exclues des dispositifs d'aides. Ce dualisme entre « grande agriculture d'exportation » et « petite agriculture vivrière pour le marché local », en partie expliqué par les conditions du milieu mais aussi par des raisons historiques, se double d'autres dualismes : reliefs accidentés versus plaines, terres irriguées versus non irriguées, filières organisées versus exploitations non organisées.

Stocks de carbone du sol et pratiques agricoles

L'information existante aux Antilles montre clairement que les sols sous cultures d'exportation (ex : canne et banane) conservent voire augmentent leurs stocks de carbone du sol. En effet, ces systèmes présentent des stocks de carbone du sol relativement élevés, bien que plus faibles que les forêts, sauf pour la banane en altitude. L'exception à cette règle générale concerne la canne à sucre sous une partie des Ferralsols du nord de la Basse-Terre en Guadeloupe, où les sols présentent une diminution des stocks de carbone du sol en lien avec la pratique du brûlis des résidus de culture. Tandis qu'en Martinique cette pratique a été déjà abandonnée depuis de nombreuses années, en Guadeloupe elle est parfois utilisée pour des raisons techniques ou traditionnelles. Compte tenu du fait que les études réalisées en Guadeloupe ont mis en évidence que le réchauffement climatique pourrait accentuer cette tendance à la perte de carbone dans les Ferralsols, il est nécessaire d'encourager les agriculteurs à abandonner cette pratique, via la formation, l'information et éventuellement des mesures incitatives.

Les transitions agricoles étudiées aux Antilles concernant les conversions de surfaces occupées par une végétation naturelle (forêts, savanes herbeuses, prairies) vers des usages agricoles, ont démontré que ces changements d'usage conduisent à des pertes de carbone plus ou moins importantes selon les types de sol. Or ce type de transition est



actuellement rare, et n'a concerné que de faibles surfaces depuis les années 2 000. En revanche, les rotations actuelles cultures pérennes/cultures annuelles, même si elles ne sont pas généralisées aux Antilles, induisent une perte de carbone associée essentiellement à l'augmentation de l'intensification du travail du sol. Cet aspect doit être resitué dans le contexte du regain d'intérêt actuel pour le développement de la « petite agriculture familiale » et, d'une manière générale, pour la diversification de l'agriculture aux Antilles. Les enjeux de maintien, voire d'augmentation, des stocks de carbone du sol en Guadeloupe et Martinique se situeraient donc principalement au niveau des systèmes de cultures maraîchères et vivrières, dont le développement pourrait être encouragé ces prochaines décennies afin de promouvoir l'autonomie alimentaire. Ces systèmes, de par leur diversification, offriraient une meilleure résilience face aux aléas climatiques que les monocultures de canne et banane, et leur développement contribuerait à alimenter le marché local. Néanmoins, l'implantation de ces systèmes aux dépens de prairies ou de cultures pérennes d'exportation pourrait entraîner une diminution des stocks de carbone du sol lorsque ces systèmes sont gérés de manière conventionnelle, avec un labour fréquent et profond, et un faible recours aux amendement organiques des sols.

Une pratique conventionnelle influençant les stocks de carbone dans les sols sous cultures annuelles en Guadeloupe et Martinique est le travail du sol, profond et/ou fréquent, avec une diminution des stocks de carbone accrue, indépendamment du type du sol. Les résultats obtenus en Guadeloupe soulignent que la réduction du travail du sol

dans les cultures de diversification (maraîchage, racines et tubercules) serait clé afin de nuancer, voire de stopper, ces pertes par sur-minéralisation de la matière organique des sols. Le développement de systèmes permacultureux et de l'agriculture de conservation, mobilisant les paillages avec des matières organiques, et la facilitation de l'accès à de la micro-mécanisation pour du travail en planche de culture, devraient permettre de minimiser le travail du sol dans les systèmes maraîchers et vivriers. Concernant la canne à sucre, des solutions existent pour le travail du sol réduit ; il convient de les développer par la mobilisation des incitations économiques (MAEC).

Similairement, le mode d'intensification des systèmes de diversification en Guadeloupe, déterminé par la durée des jachères entre les cultures, peut aussi contribuer à réduire les pertes de carbone via la réduction des labours et l'augmentation de la biomasse végétale recyclée dans les sols. Pourtant, les études menées en Martinique ont montré que la durée des jachères n'est pas une variable pertinente pour déterminer les changements de stocks de carbone sous maraîchage.



La végétation de la Martinique (crédit photo : L. Jacob)

De toute évidence, les études sur la contribution des jachères au stock de carbone des sols mériteraient d'être élargies en tenant compte du type du sol et de la végétation colonisatrice. Cependant, la faible taille des exploitations agricoles guadeloupéennes et martiniquaises peut largement conduire à réduire l'adoption des jachères pour des raisons économiques. Un levier à activer serait d'accroître la labellisation des productions (ex : Agriculture Biologique) pour augmenter la valeur ajoutée des productions.

Transition agroécologique et carbone du sol

Un certain nombre de pratiques de gestion sont actuellement promues dans une perspective de transition agroécologique de l'agriculture aux Antilles, telles que l'apport d'amendements organiques, les associations culturales, l'agroforesterie, ou la pratique du jardin créole. L'effet de ces pratiques sur les stocks de carbone dans les sols antillais n'est actuellement pas complètement renseigné. Les travaux les plus conséquents ont concerné les amendements organiques, aussi bien relativement à leur potentiel stockant qu'aux conditions socio-économiques de leur adoption par les agriculteurs. De ces études, il ressort que la généralisation de l'utilisation des amendements organiques aux Antilles dépend fortement de l'amélioration des systèmes de recyclage des déchets organiques, qui déterminent les quantités d'amendements disponibles (collecte, traitement, mise à disposition, plateformes de compostage), de la réduction des contraintes associées à leur épandage (pénibilité, coût) et de l'élaboration de mesures incitatives type MAEC qui soient accessibles notamment aux

petits exploitants gérant en priorité des systèmes diversifiés. Aussi, au vu des stocks importants que présentent les prairies fertilisées, un mode de gestion durable vis-à-vis du carbone consisterait en la mise en place de rotations cultures maraîchères/prairies. Il est indéniable que cette pratique nécessite une vision dans le temps long (ex : rotations sur 10 ans) et un changement dans les modalités de gestion de l'élevage aux Antilles, qui est souvent spécialisé. Ce dernier aspect est aussi valable pour l'agroforesterie et le sylvopastoralisme : ces systèmes sont très efficaces en termes de séquestration de carbone mais nécessitent des investissements (financiers et humains) de long terme et une technicité accrue par rapport aux systèmes actuels. Faciliter l'accès au foncier et aux préfinancements des investissements pour l'installation de jeunes agriculteurs pourrait permettre de développer ces systèmes plus intégrés, à développer en cohérence avec une stratégie de valorisation labellisée sur le marché local dans le cadre de circuits courts. Que ce soit sur le développement de l'agroforesterie, de l'agro-sylvopastoralisme, du travail du sol réduit ou de l'usage d'amendements organiques, un levier important à activer réside dans la formation aux pratiques agroécologiques, à travers la formation professionnelle, l'information et le conseil au niveau des organisations de producteurs mais aussi au niveau de l'enseignement agricole initial.

Impact de l'artificialisation des sols

Il est également important de noter l'importance de l'artificialisation des sols dans les dynamiques de changements de mode d'occupation. Les sols artificialisés représentent environ 15 % du territoire aux Antilles, contre en moyenne 9 % en France métropolitaine. L'effet de l'artificialisation des sols sur les stocks de carbone n'est pas documenté aux Antilles, ni dans les autres territoires d'Outre-mer, alors qu'elle est un des changements à documenter dans les PCAET (Plan Climat-Air-Energie Territorial).

Atteinte de l'objectif « 4 pour 1000 » aux Antilles

En ce qui concerne l'Initiative « 4 pour 1000 », il semble évident que la richesse en matière organique des sols volcaniques antillais opère comme une contrainte majeure à son application généralisée, du fait qu'elle intéresserait seulement les sols les plus pauvres et/ou dégradés. Dans ces cas, la mise en place des pratiques telles que l'utilisation des amendements organiques et la réduction des labours devraient suffire pour atteindre cet objectif.

L'enjeu principal aux Antilles serait en revanche le maintien des stocks de carbone aux niveaux actuels, relativement élevés, ce qui contribuerait à assurer la durabilité de la ressource sol et la sécurité alimentaire dans un contexte contraignant à cause du réchauffement climatique. Cela impliquera des modifications importantes des systèmes agricoles, lesquels devraient faire appel à une plus grande technicité collective (décideurs et professions agricoles) via le recyclage des biomasses, le développement des systèmes agroforestiers et sylvopastoraux, et une utilisation plus intense des espèces légumineuses, seules ou en association.

En termes de recommandations d'actions politiques, on voit que la question du stockage de carbone dans les sols renvoie à la question de la transition agroécologique. Celle-ci sera facilitée par la structuration des filières de diversification, notamment pour faciliter l'accès aux dispositifs de financements comme les PSE, le développement de l'Agriculture Biologique et des circuits courts (permettant une réhabilitation de la place de l'activité agricole locale sur le marché local) et l'installation de jeunes agriculteurs en facilitant la transmission et l'accès au foncier mais aussi aux financements. La mise en œuvre des systèmes agroécologiques requiert en effet une vision sur le long terme et, face au vieillissement des actifs agricoles, la transmission des savoirs et du foncier est un enjeu clé.

Présentation du territoire

Contexte biophysique

Situation géographique, topographie

La Réunion est une île de l'archipel des Mascareignes, située dans l'océan Indien, au large de Madagascar (Figure 44). La topographie de l'île est marquée par un relief important et accidenté, en raison de l'histoire volcanique de l'île. Les zones d'altitude inférieure à 200 m ne sont présentes qu'au niveau du littoral ; le centre de l'île est montagneux, avec un point culminant à 3 070 m au niveau du Piton des Neiges. Des cirques sont présents dans le centre de l'île (Cilaos, Salazie, Mafate). On retrouve dans le centre-sud-est de l'île des reliefs importants, correspondant au Piton de la Fournaise. Une plaine d'altitude (Plaine des Cafres) se situe entre le massif du Piton de la Fournaise et le massif du Piton des Neiges.

Géologie

La Réunion est une île volcanique, constituée de deux grands massifs (Figure 45). Le massif du Piton des Neiges est le plus ancien ; sa mise en place a débuté il y a environ 2,5 millions d'années, au cours d'une phase basaltique jusqu'à - 430 000 ans. Les roches affleurantes les plus anciennes sont âgées de 2,3 millions d'années. La phase récente du volcan (entre - 340 000 et - 9 000 ans) a vu la mise en place d'un strato-volcan, avec une activité de plus en plus explosive au cours du temps. La formation des cirques est due à l'effondrement des chambres magmatiques et à l'érosion. Le massif du Piton de la Fournaise est un ensemble plus récent (- 500 000 ans), actif au niveau du Piton de La Fournaise, avec une activité principalement effusive.

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

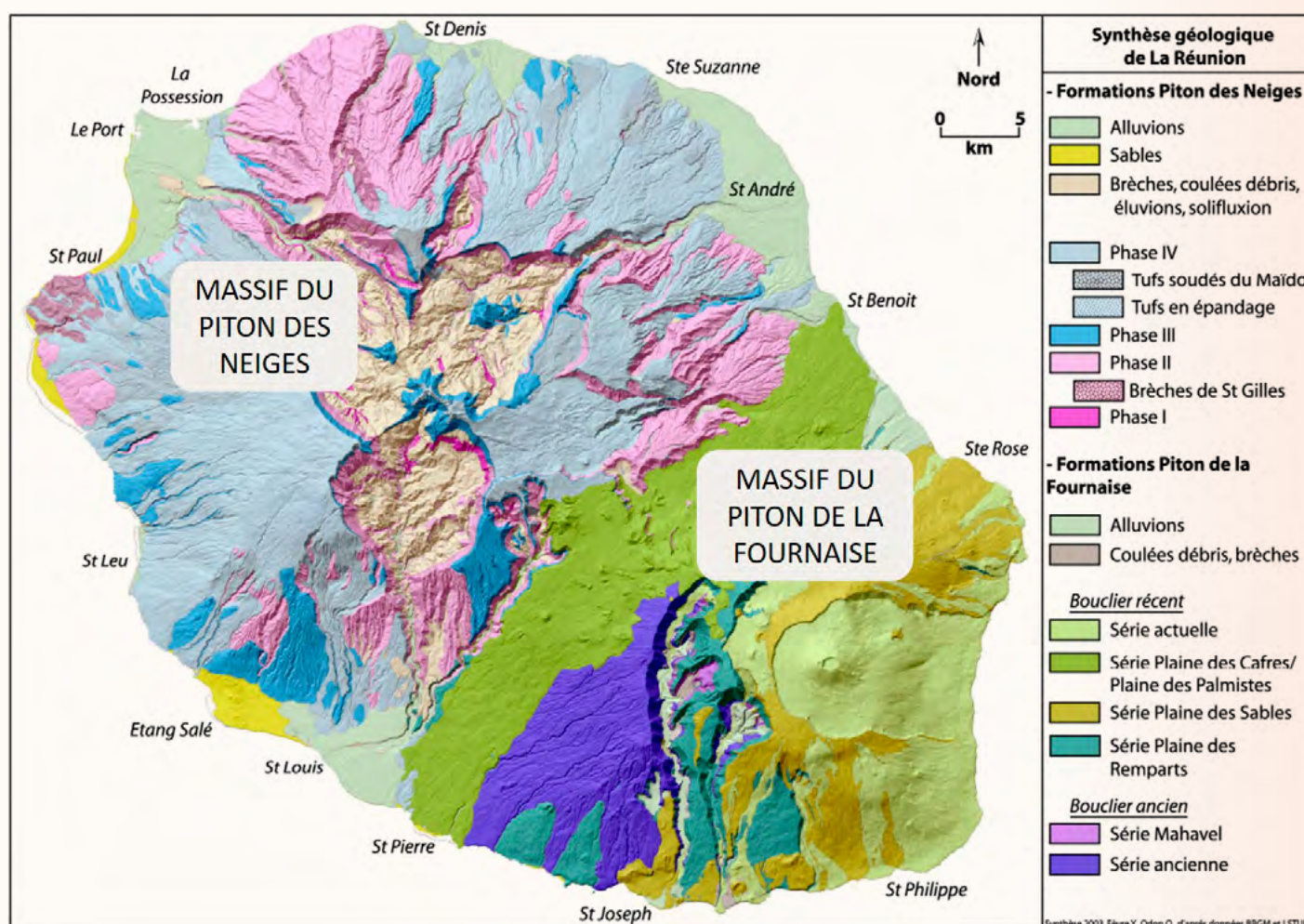


Figure 45 - Carte géologique de La Réunion. [BRGM (2006), adapté par Allo (2019)]

Climat

Le climat de La Réunion est tropical, mais est fortement influencé par la topographie et le sens des vents dominants. Le fort gradient altitudinal (de 0 à 3 000 m) induit une variabilité importante de la température moyenne à l'échelle de l'île (Figure 46). Le climat est donc considéré comme tempéré montagnard dans les hauteurs du centre de l'île. En outre, la variabilité spatiale

des précipitations annuelles est très importante, sous l'influence des vents dominants. Ces alizés proviennent de l'est, ce qui, conjugué au relief de l'île, entraîne des précipitations importantes dans l'est de l'île pouvant dépasser les 6 000 mm par an (côte au vent), tandis que les précipitations sont inférieures à 1 000 mm par an sur le littoral ouest (côte sous le vent).

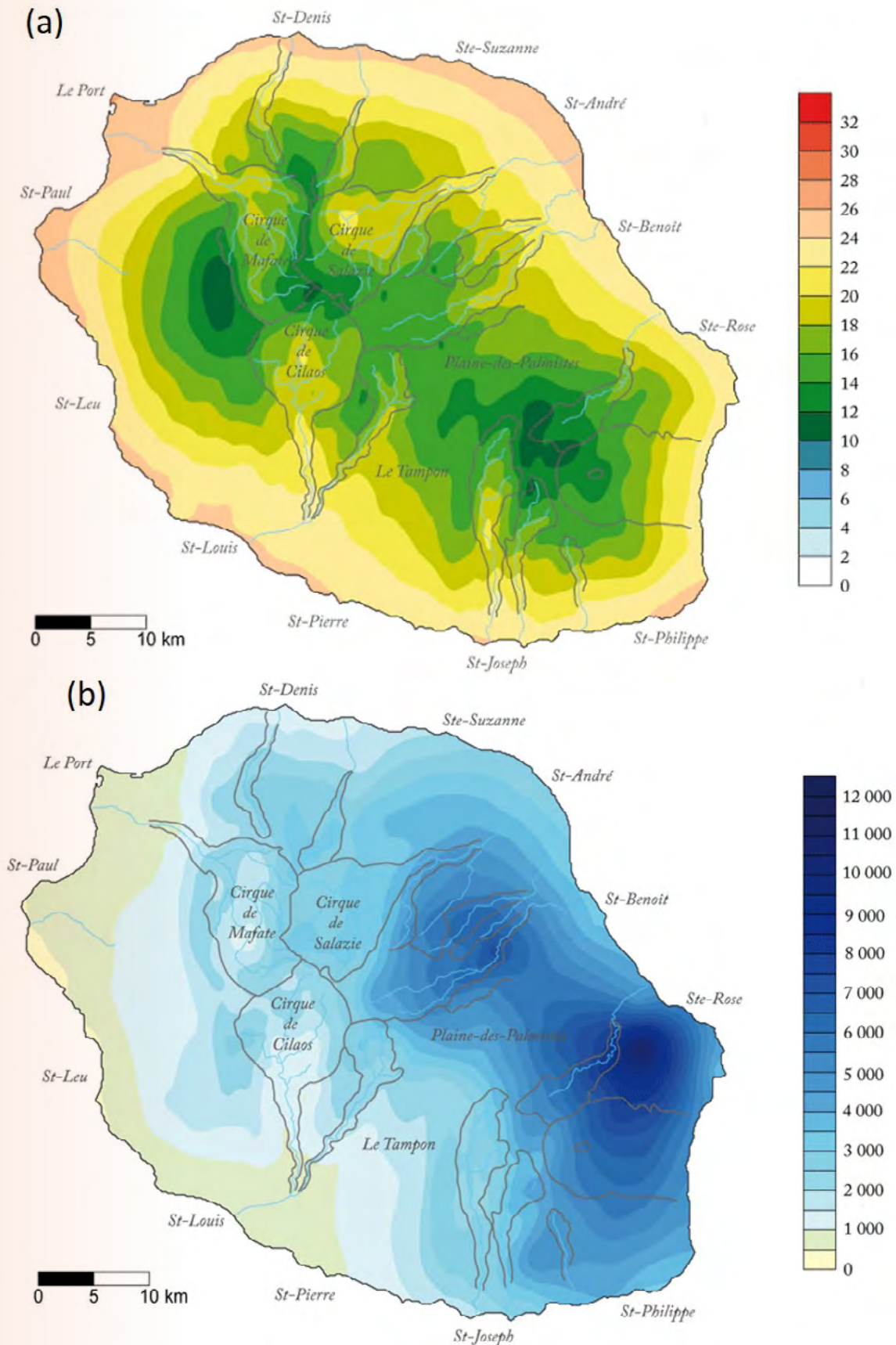


Figure 46 - Cartes de la température moyenne annuelle à La Réunion [a] et de la pluviométrie annuelle [b] (données Météo-France, in Allo (2019))

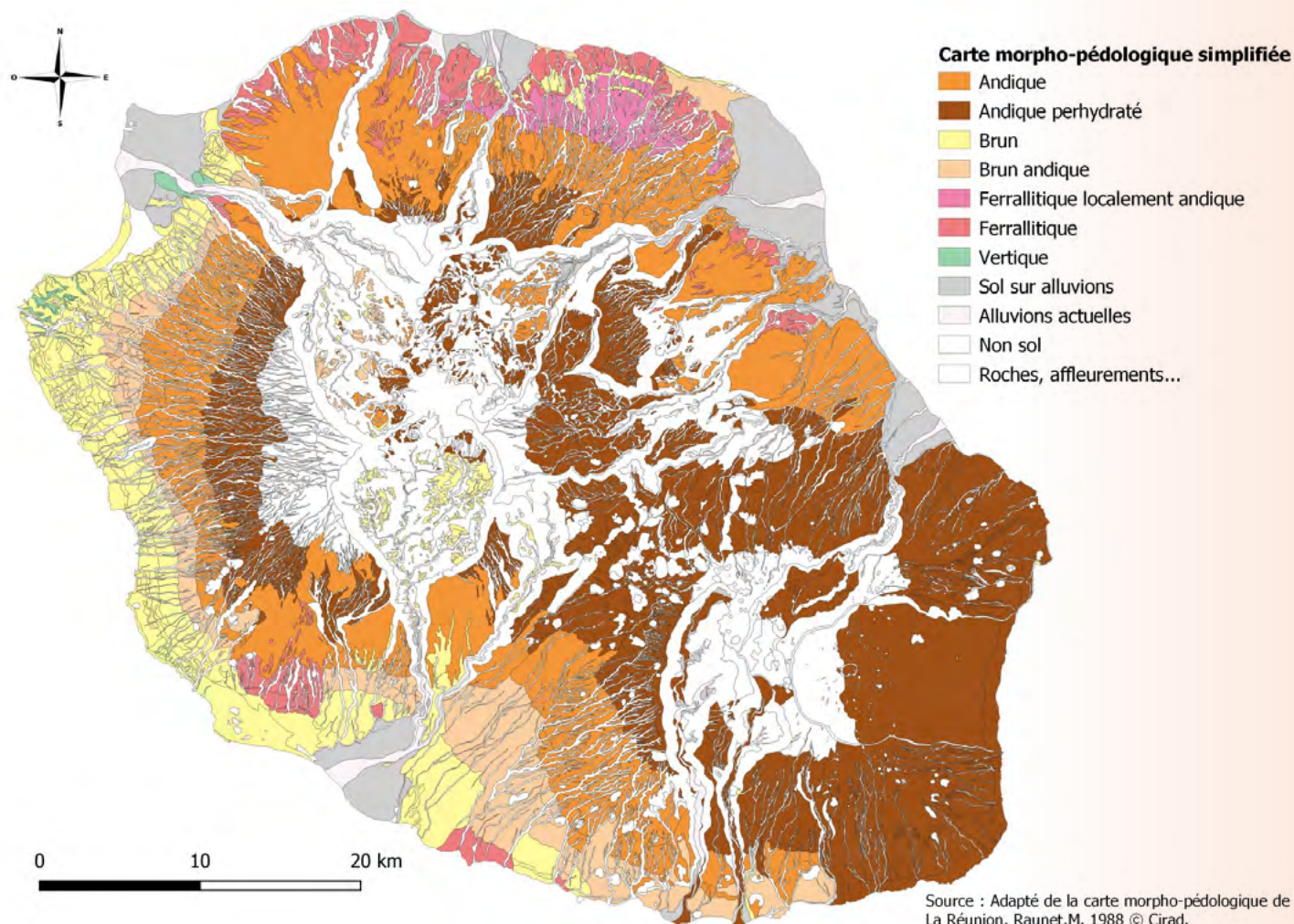


Figure 47 - Carte morpho-pédologique simplifiée de La Réunion. (Pouzet (2002), adapté de Raunet (1988))

Typologie des sols

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

Plusieurs cartes pédologiques ont été produites à La Réunion, dont les correspondances entre les types de sols sont synthétisées par Feder et Bourgeon (2009). Pouzet (2002) a réalisé une carte morpho-pédologique simplifiée, à partir des travaux de Raunet (1988) : huit types de sols ont été distingués dans cette carte morpho-pédologique (Figure 47) :

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

d'oxyhydroxydes de fer. Ces sols se sont formés sur des dépôts volcaniques anciens, dans des conditions bien plus sèches que pour les sols andiques. Les sols bruns andiques correspondent à un stade de développement intermédiaire entre les sols bruns et andiques. Les sols bruns sont localisés sur les façades ouest et sud-ouest de l'île, caractérisées par un climat tropical relativement sec.

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

Contexte agricole et forestier

Plus de la moitié de la superficie de La Réunion est occupée par les forêts (Agreste (2021)), que l'on retrouve principalement dans les zones montagneuses (les « Hauts ») de l'île (Figure 48). En raison de l'activité volcanique récente, une part importante de la superficie est couverte de roches nues ou colonisées par de la végétation naturelle. Les usages agricoles représentent 18 % de la surface de l'île en 2018 (Agreste (2021)) et sont concentrés sur la bande littorale et au niveau de la plaine d'altitude située entre les deux vol-

cans (la Plaine des Cafres). La canne à sucre est la culture dominante à La Réunion ; elle occupait, en 2018, 22 855 ha sur les 28 825 ha de terres arables (Agreste La Réunion (2019)), principalement sur les façades nord-est et sud du littoral. Les cultures fruitières et maraîchères couvrent respectivement 2 876 et 2 056 ha en 2018. Les prairies permanentes occupent environ 10 000 ha, elles sont présentes au niveau de la Plaine des Cafres et sur les contreforts ouest du massif du Piton des Neiges.

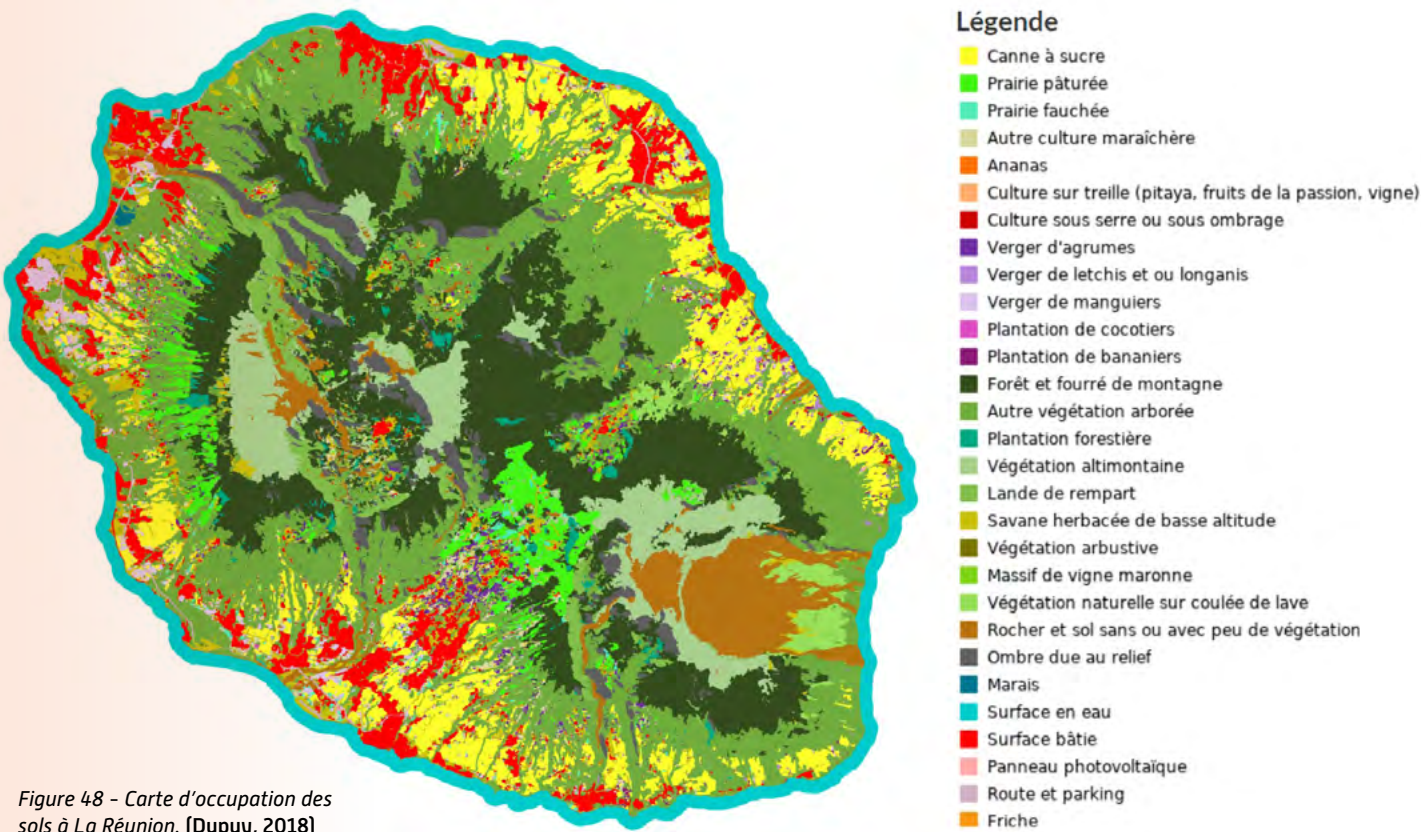


Figure 48 - Carte d'occupation des sols à La Réunion. [Dupuy, 2018]

Surfaces en hectares	2010	2020	Evolution 2020/2010
Canne à sucre	24 336	21 423	-12%
Légumes frais	1 671	1 363	-18%
Pommes de terre et autres tubercules	296	391	32%
Légumes secs	19	18	-5%
Plantes aromatiques, médicinales et à parfum	493	661	34%
Fruits	2 781	3 258	17%
Céréales et oléagineux	106	26	-75%
Cultures fourragères et surfaces toujours en herbe	12 042	10 757	-11%
Fleurs et plantes ornementales	168	159	-5%
Vignes	17	12	-29%
Pépinières	43	36	-16%
Autres surfaces [semences, jardins créoles, etc.]	108	22	-80%
Surface agricole utilisée [SAU]	42 814	38 774	-9%

Tableau 16 - Usages des sols agricoles à La Réunion et évolution entre 2010 et 2020. Source : Recensements généraux agricoles 2010 et 2020.

Comme le montre la Figure 49, les surfaces agricoles et le nombre d'exploitations déclinent régulièrement à La Réunion. En 2020, la DAAF recensait 6 282 exploitations agricoles (Agreste (2022)). Cette baisse du nombre d'exploitations s'est traduite par une augmentation de la SAU moyenne des exploitations, passant de 3,5 ha en 1989 à 6,2 ha en 2020.

Le Tableau 16 montre que les surfaces en canne à sucre représentent à elles seules plus de 50 % de la SAU. Plus de 25 % de la

SAU est consacrée aux cultures fourragères et surfaces en herbe. Ces usages ont tendance à diminuer au profit des surfaces dédiées à la production fruitière, aux plantes aromatiques et aux tubercules. En outre, on observe une baisse globale de la SAU (-4 000ha en 10 ans, soit -400 ha/an).

Le Tableau 17 met en évidence une relative stabilité de la production bovine entre 2010 et 2020, tandis que les productions porcine, ovine et avicole ont marqué une nette augmentation.

Effectifs des cheptels	2010	2020	Evolution 2020/2010
Bovins	27 700	27 200	-2%
Dont vaches laitières	3 500	2 500	-29%
Dont vaches nourrices	9 500	8 400	-12%
Porcins	11 597	8 956	-23%
Dont reproducteurs de 50 kg et +	70 600	74 100	5%
Caprins	18 100	13 600	-25%
Ovins	2 500	4 400	76%
Volailles	2 867 000	3 505 000	22%
Dont poules pondeuses, poulettes	689 000	825 000	20%
Dont poulets de chair	1 897 000	1 896 000	0%

Tableau 17 - Les effectifs des cheptels à La Réunion et évolution entre 2010 et 2020. Source : Recensements généraux agricoles 2010 et 2020.

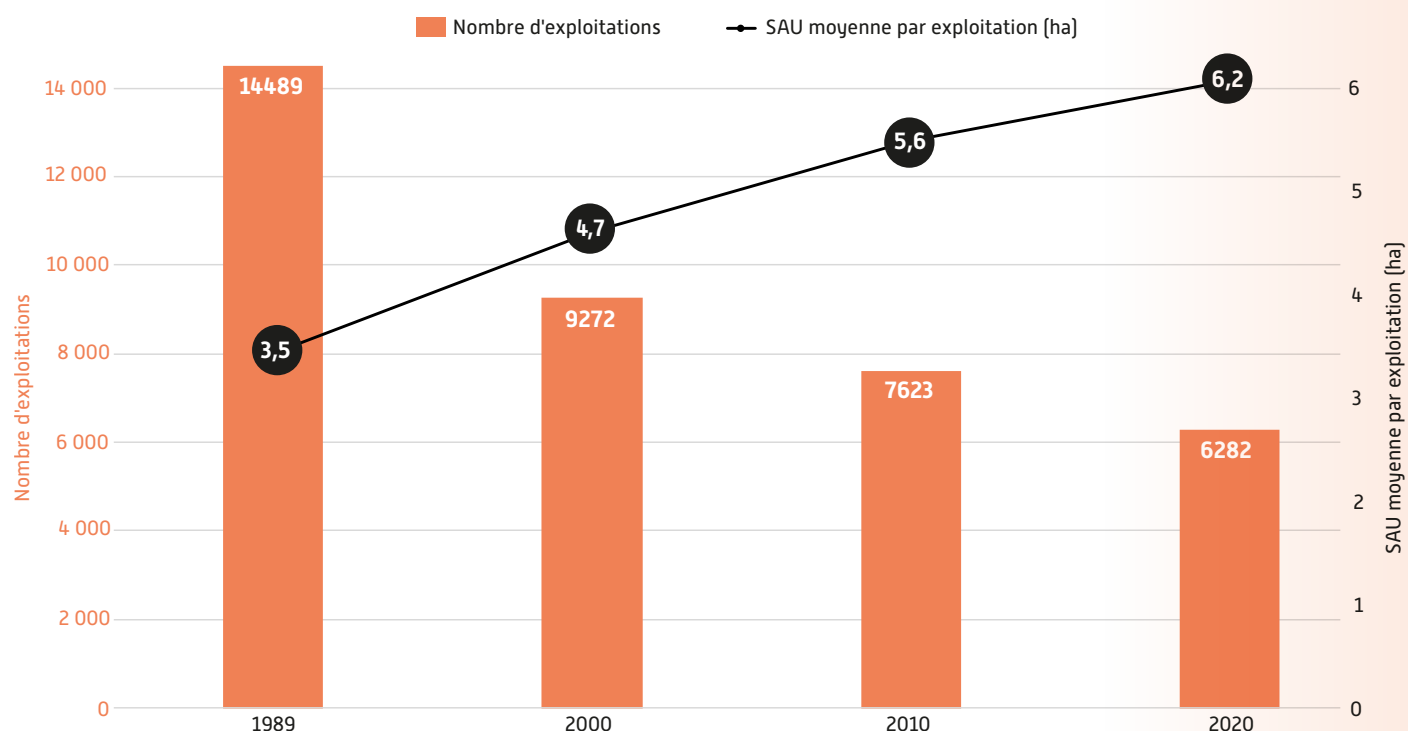


Figure 49- Evolution de la SAU et de la taille moyenne des exploitations agricoles à La Réunion. Source : Mémento de la Statistique Agricole, DAAF974, 2022.

Stocks de carbone dans les sols et principaux déterminants

Principales sources de données mobilisées

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

L'effet des pratiques de gestion sur les stocks de COS a été étudié au travers de dispositifs expérimentaux à l'échelle de la parcelle, où a été testé l'effet de l'apport de produits résiduels organiques (Jamoteau (2018) ; Jamoteau et al. (2021) ; Viaud (2019)). Pour ces deux échelles d'étude, les données disponibles ne concernent que les sols agricoles. Les stocks de COS dans les sols couverts par la végétation naturelle et leur évolution à la suite des changements d'usage n'ont pas été étudiés à La Réunion.

L'évaluation des stocks de COS à l'échelle de La Réunion était l'un des objectifs du projet C@RUN (Allo (2019) ; Todoroff et al. (2019)). Cette évaluation s'est appuyée sur l'analyse d'une base de données d'analyses de sols agricoles de La Réunion

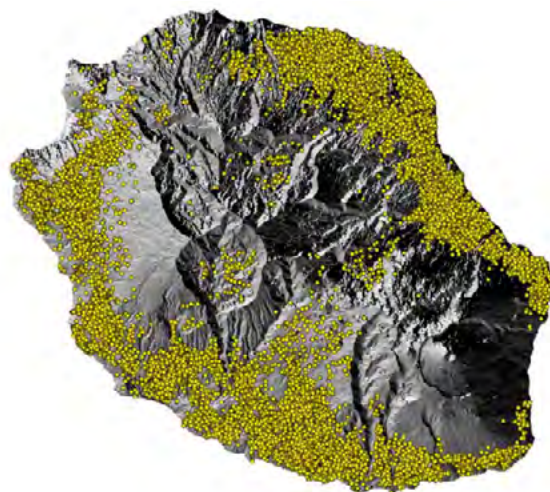


Figure 50 - Localisation des analyses de sols présentes dans la base de données d'analyses de sols de La Réunion. Les points jaunes figurent les lieux des prélèvements. [Todoroff et al. (2019)].

appartenant au Cirad (Collinet et al. (2021)), contenant environ 45 000 analyses chimiques réalisées entre 1993 et 2017 (Todoroff et al. (2019)).

Estimation de la densité apparente des sols par spectrométrie infra-rouge

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

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

L'estimation de la densité apparente des échantillons de sols analysés dans la base de données constitue donc une importante étape, permettant par la suite de calculer les stocks de COS puis de les spatialiser à l'échelle des espaces agricoles à La Réunion. Cette estimation de la densité apparente a été réalisée de manière concomitante à une classification spectrale des sols des échantillons de la base de données, et est décrite dans Allo et al. (2020).

Analyse globale des déterminants des teneurs en carbone du sol

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

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

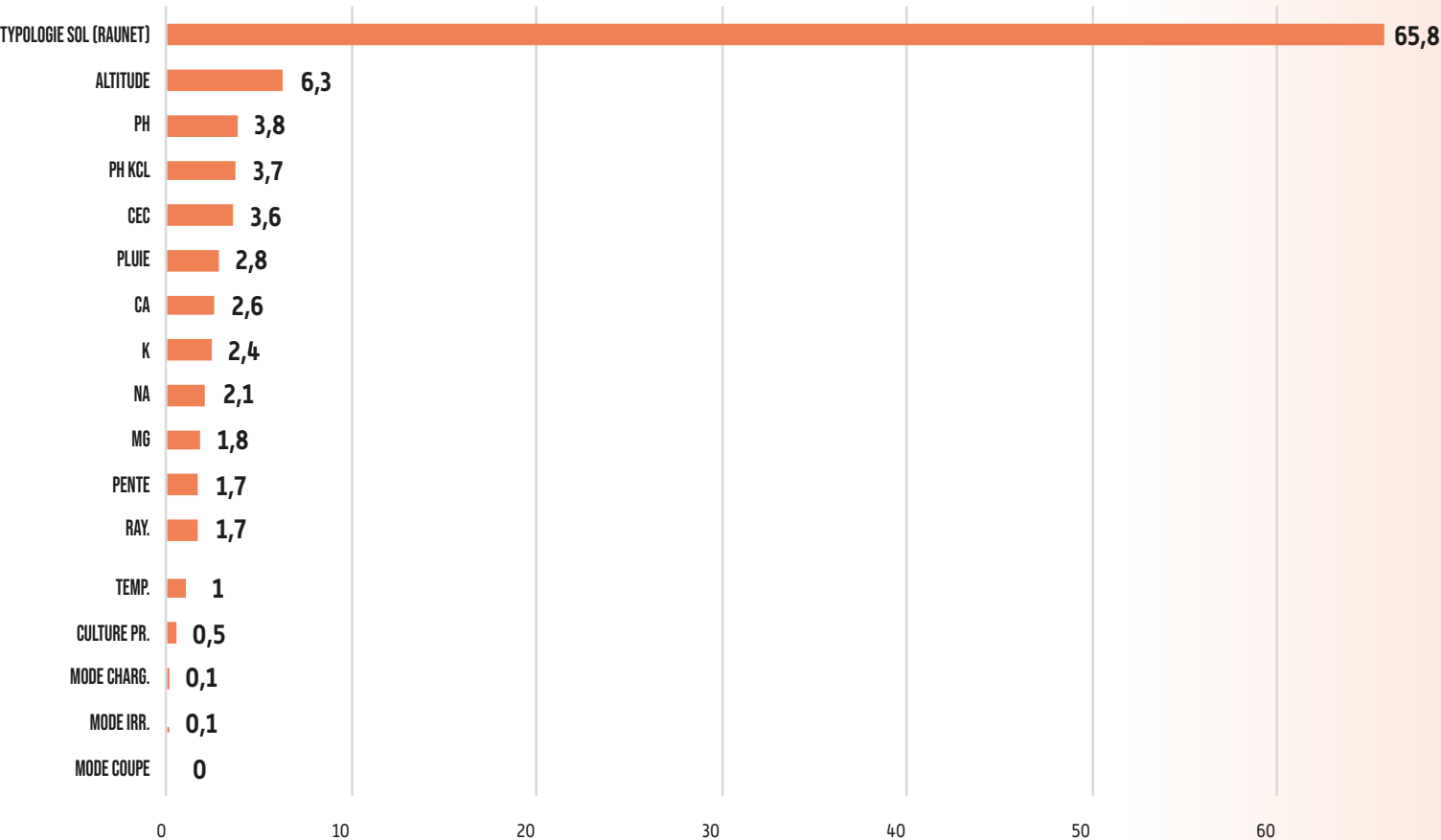


Figure 51 - Importance relative des déterminants des teneurs en COS du modèle BRT (arbres de régression boostés), sur 7949 échantillons de sols de la base de données d’analyses de sols du Cirad. [Allo (2019)].

Stocks de carbone du sol selon le type de sol

Le type de sol est un déterminant majeur de la variabilité des teneurs et des stocks de COS à La Réunion. La comparaison des teneurs en COS selon les types de sol a été réalisée par Allo (2019) en comparant deux systèmes de classification des sols : celui de la carte morphopédologique simplifiée de Pouzet (2002) et celui établi lors de la thèse de Allo (2019) à partir des analyses spectrales. La correspondance entre les unités pédologiques spectrales, les abréviations utilisées dans certaines figures de ce document, et la minéralogie dominante de ces types de sols est présentée en Tableau 1.

Correspondance entre unités pédologiques spectrales, abrévia-

tions utilisées et minéralogie dominante dans ces sols (Allo, 2019). Allo (2019) montre que le coefficient de variation des teneurs en COS est réduit lorsque la teneur en COS est analysée selon le type de sol spectral, justifiant la pertinence de cette classification pour discriminer les teneurs et stocks de COS selon le type de sol (Figure 51). Le coefficient de variation très élevé pour l’unité n°2 (code P) peut s’expliquer par le fait que ces sols sont peu évolués et développés sur des apports de matériaux érodés, dont la composition minéralogique peut être très variable.

Les stocks de COS estimés, selon le type de sol spectral pour 962 échantillons représentatifs de l’île et issus de sols cultivés en

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

Tableau 18 - Correspondance entre unités pédologiques spectrales, abréviations utilisées et minéralogie dominante dans ces sols [Allo (2019)].

canne à sucre, montrent les tendances suivantes : les sols riches en allophanes, aux propriétés andiques (abréviations Aa, Ah, Ag) présentent les stocks de COS les plus importants, tandis que les sols dominés par l'halloysite et la gibbsite (Ga, Gh, H, Hh, Hi) présentent les stocks de COS les plus faibles (Figure 52). Les stocks de COS élevés dans les sols andiques sont expli-

qués par la présence d'allophanes, qui contribuent à la stabilisation de la matière organique selon différents mécanismes dont la formation de complexes métal-humus-argiles (Huygens et al. (2005)) et l'emprisonnement de molécules organiques au sein de la structure fractale des agrégats d'allophanes (Chevallier et al. (2010)).

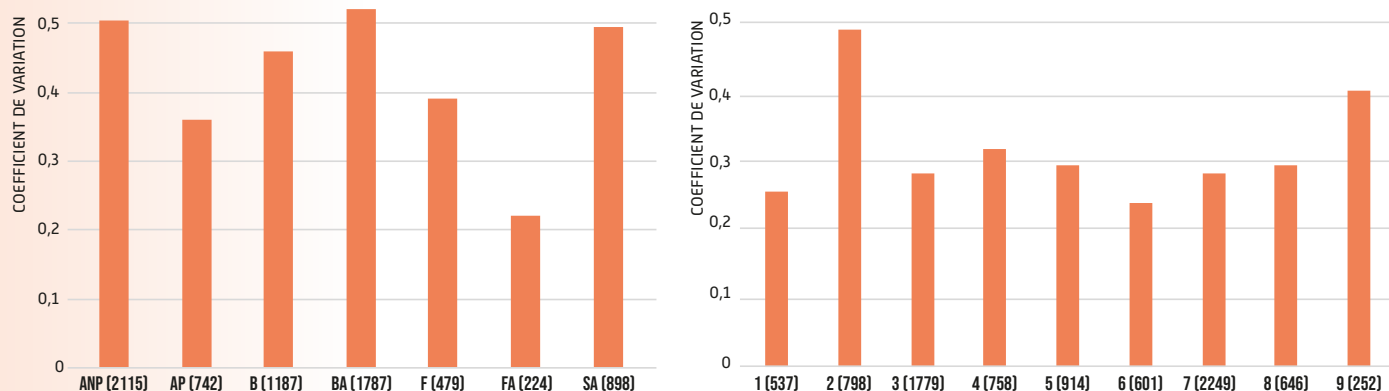


Figure 52 - Coefficients de variation des teneurs en COS par type de sol (Allo, 2019) selon les types de sol de la carte morphopédologique de Pouzet (2002) (a) et selon les unités pédologiques spectrales définies par Allo (2019) (b). Les effectifs sont indiqués entre parenthèses (Allo (2019)).

Stocks de carbone du sol selon l'usage du sol

Les stocks de COS selon l'usage et le type de sol sont représentés en Figure 53. Le jeu de données correspondant est la population d'environ 8000 points de la base de données pour laquelle les stocks de COS ont été calculés. Cette représentation ne laisse pas apparaître de tendance évidente sur l'effet du mode d'usage par type de sol, en raison du déséquilibre du jeu de données considéré ici : la base de données contient en effet une grande majorité d'analyses de sols provenant de sols cultivés en canne à sucre. Ce déséqui-

libre, conjugué à la grande variabilité subsistant dans l'effet du type de sol spectral sur les stocks de COS pour les sols cultivés en canne à sucre, ne permet pas de mettre en évidence un effet du mode d'usage à l'échelle globale de La Réunion.

Les modes d'usages des sols et leurs changements conditionnent cependant de façon importante la dynamique temporelle des stocks de COS à La Réunion, mais ces effets ne peuvent être mis en évidence qu'à une échelle plus fine.

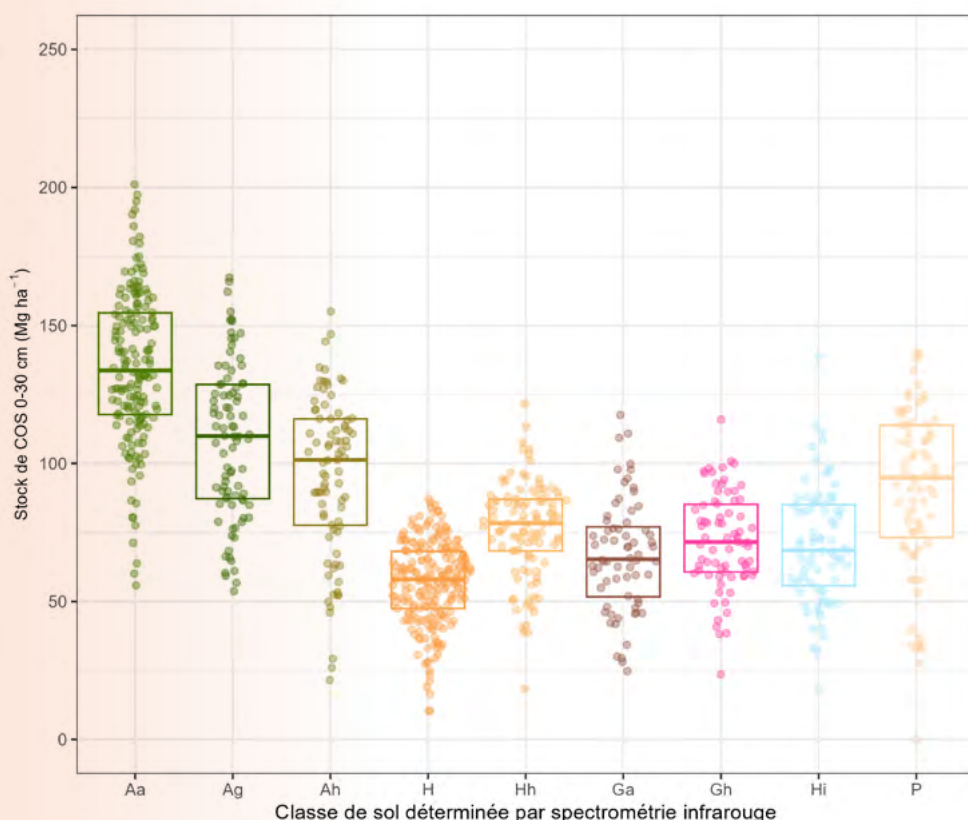


Figure 53 - Stocks de COS selon la classe de sol spectral, sur 962 échantillons de la base de données d'analyses de sols du Cirad, cultivés majoritairement en canne à sucre. (Allo (2019)).

Spatialisation des stocks de carbone du sol

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

1. Des unités pédologiques spectrales homogènes ont été créées à partir du jeu de données de 8742 points de la base de données pour lesquels le type de sol spectral a été prédit (Figure 54). Les unités pédologiques spectrales ont été créées par la méthode des polygones de Voronoï. En raison de la création de très petites unités cartographiques par cette méthode, certains points de la base de données ont été supprimés afin de simplifier l'information et ne garder que des unités de superficie > 50 ha. La spatialisation des unités pédologiques a donc été effectuée à partir de 7222 points.
2. Ces unités pédologiques spectrales ont été croisées avec des unités climatiques délimitées selon les critères du GIEC, constituant une carte d'unités pédoclimatiques homogènes. Cette carte pédoclimatique a été croisée avec la carte des usages agricoles à La Réunion (Figure 55).
3. Les stocks de COS moyens et leur écart-type ont été calculés pour l'ensemble des unités pédoclimatiques intersectées avec la carte des usages, permettant de cartographier les stocks de COS moyens par unité agropédoclimatique. La carte finale est représentée en Figure 56.

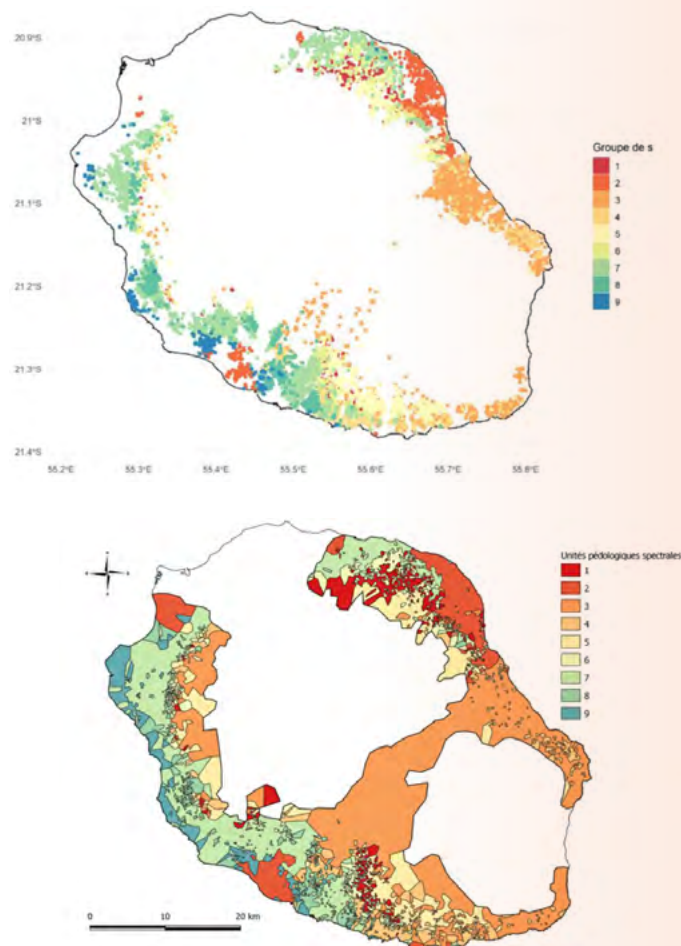
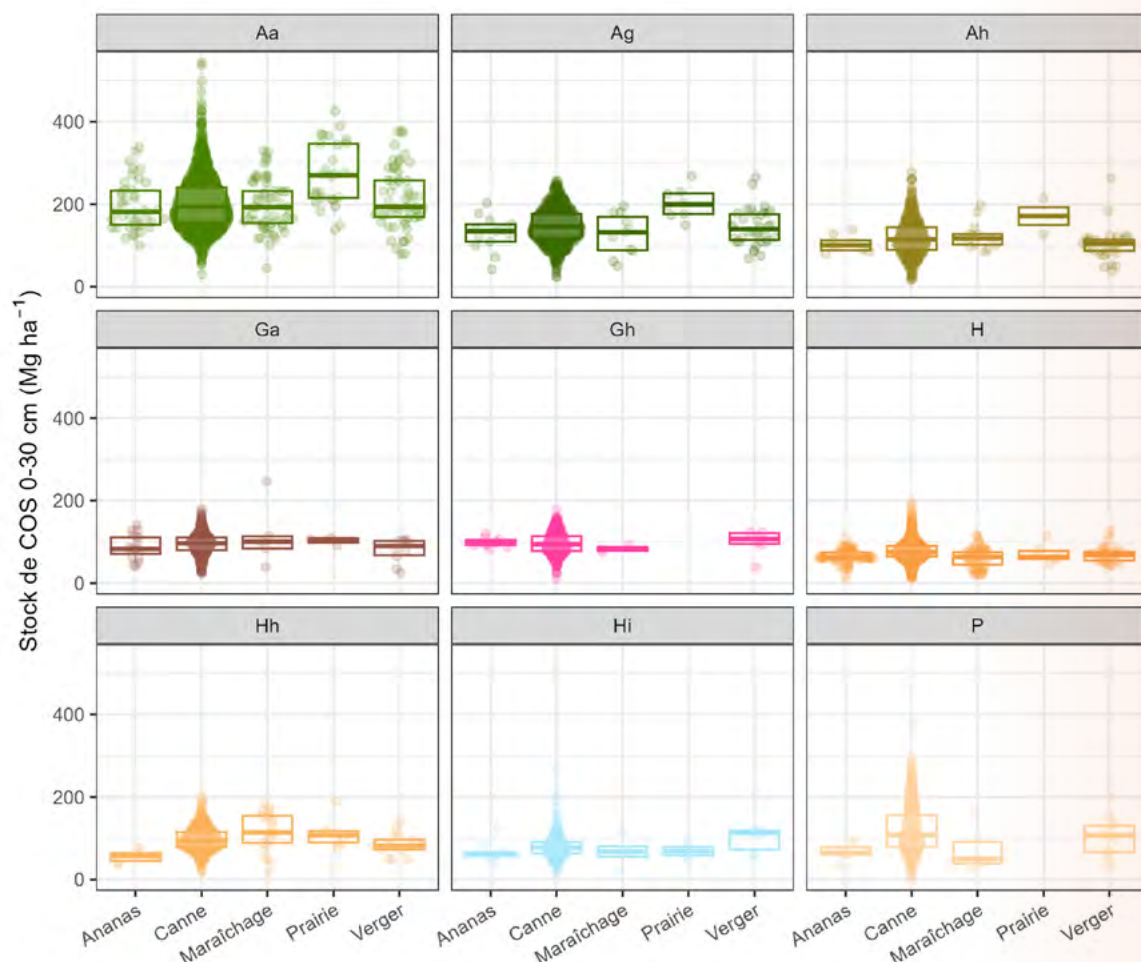


Figure 54 - Stocks de COS selon le mode d'usage et le type de sol spectral dans la base de données du Cirad à La Réunion. La minéralogie dominante des types de sol est décrite en Tableau 16. [Allo (2019)]

Figure 55 - Spatialisation des 8742 points de la base de données avec le type de sol spectral associé, et cartographie des unités pédologiques spectrales générées par les polygones de Voronoï. [Allo (2019)]



De façon logique, la variabilité spatiale des stocks de COS à La Réunion est largement liée à la distribution des sols. Les stocks de COS les plus élevés sont localisés dans les régions d'altitude et sur le pourtour des volcans, correspondant aux sols andiques, cultivés en canne ou sous prairie (Figure 56). Les stocks de COS les plus faibles sont localisés sur le littoral ouest et nord, où dominent les sols riches en gibbsite et halloysite (sols bruns et ferrallitiques). L'incertitude est corrélée

aux stocks moyens, elle est la plus élevée pour les sols andiques. Sur l'ensemble du territoire agricole, plus de la moitié du stock de COS total est contenu dans les sols andiques du groupe de sol spectral n°3 (Tableau 17), et près de la moitié du stock de COS total est contenu dans les sols cultivés en canne à sucre. Les prairies ne couvrent que 16 % du territoire agricole, mais contiennent 26 % du stock de COS total. Au total, les sols agricoles réunionnais contiennent 7,6 MtC.

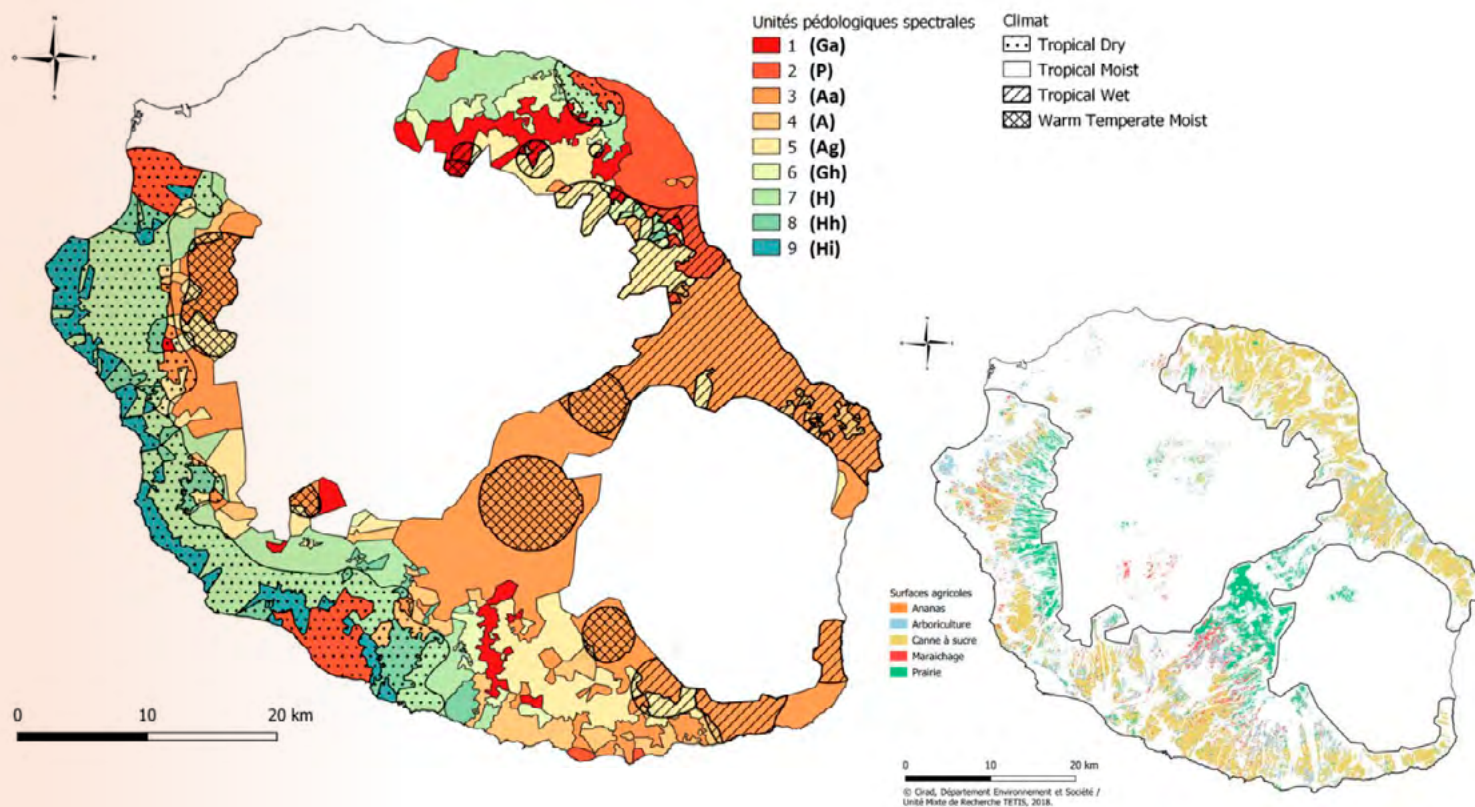


Figure 56 - Carte des unités pédoclimatiques et carte des usages agricoles (Allo, 2019)

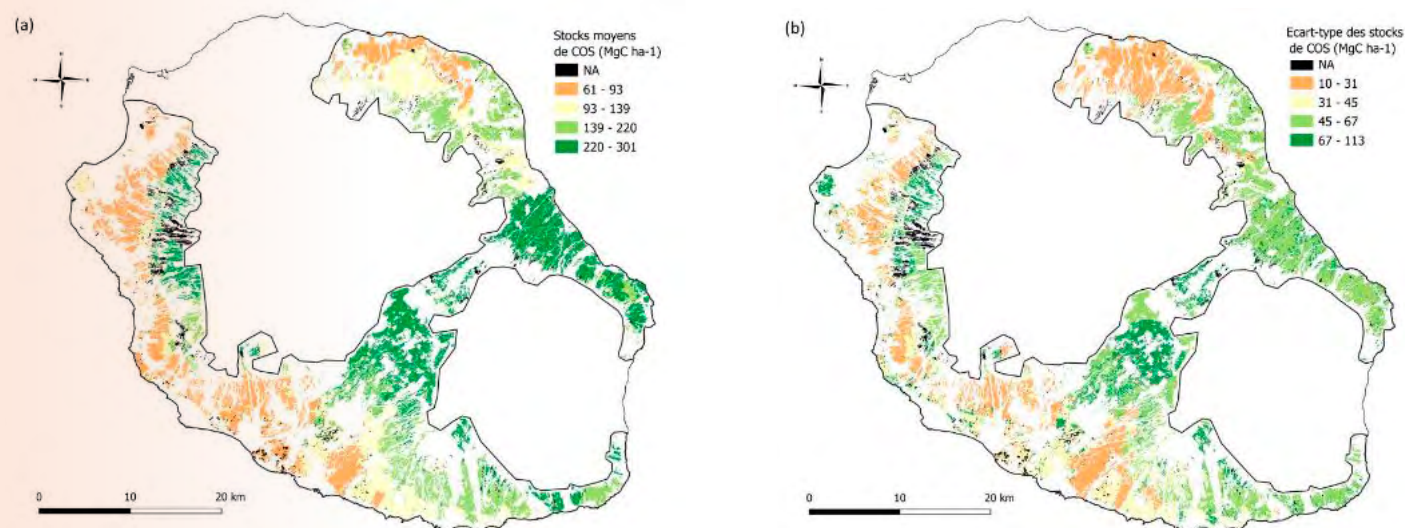


Figure 57 - Carte des stocks de COS [a] et de leur écart-type [b] dans les sols agricoles de La Réunion. [Allo (2019)]

Groupe de sol	Quantité de COS		Surfaces		Usage	Quantité de COS		Surfaces	
	MgC	%	ha	%		MgC	%	ha	%
1	262 707	3	2 519	5	Ananas	52 490	1	470	1
2	455 386	6	3 660	8	Canne	3 527 490	47	25 671	55
3	4 236 520	56	17 125	37	Maraîchage	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					
Total	7 554 083		46 536		Tous usages	7 554 083		46 536	

Tableau 19 - Quantités de COS totales par groupe de sol et usage agricole. [Allo (2019)]

Effets des changements d'usage des sols sur le carbone du sol

L'analyse de la base de données d'analyses des sols du Cirad offre l'opportunité d'étudier l'évolution tendancielle des teneurs en COS au cours du temps dans les cultures de canne à sucre, étant donné que la date d'analyse est renseignée dans la base de données, et que certains îlots culturaux ont été échantillonnés à plusieurs reprises entre 1993 et 2017, sans que l'usage n'ait changé durant cette période (Figure 57).

Si quelques îlots voient leurs teneurs en COS baisser ou augmenter au cours du temps, dans la plupart des situations les teneurs en COS sont stables au cours du temps. Cette stabilité a amené à

considérer les cultures de canne à sucre comme un usage de référence à La Réunion, étant donné leur implantation très ancienne sur l'île, débutée il y a environ 200 ans (Allo (2019) ; Allo et al. (2017)).

L'effet des changements d'usage sur les stocks de COS a été étudié au cours du projet C@RUN (Allo (2019) ; Todoroff et al. (2019)). Compte tenu du contexte agricole réunionnais et des données disponibles dans la BDD d'analyses de sol du Cirad, les transitions étudiées sont la conversion des surfaces cultivées en canne

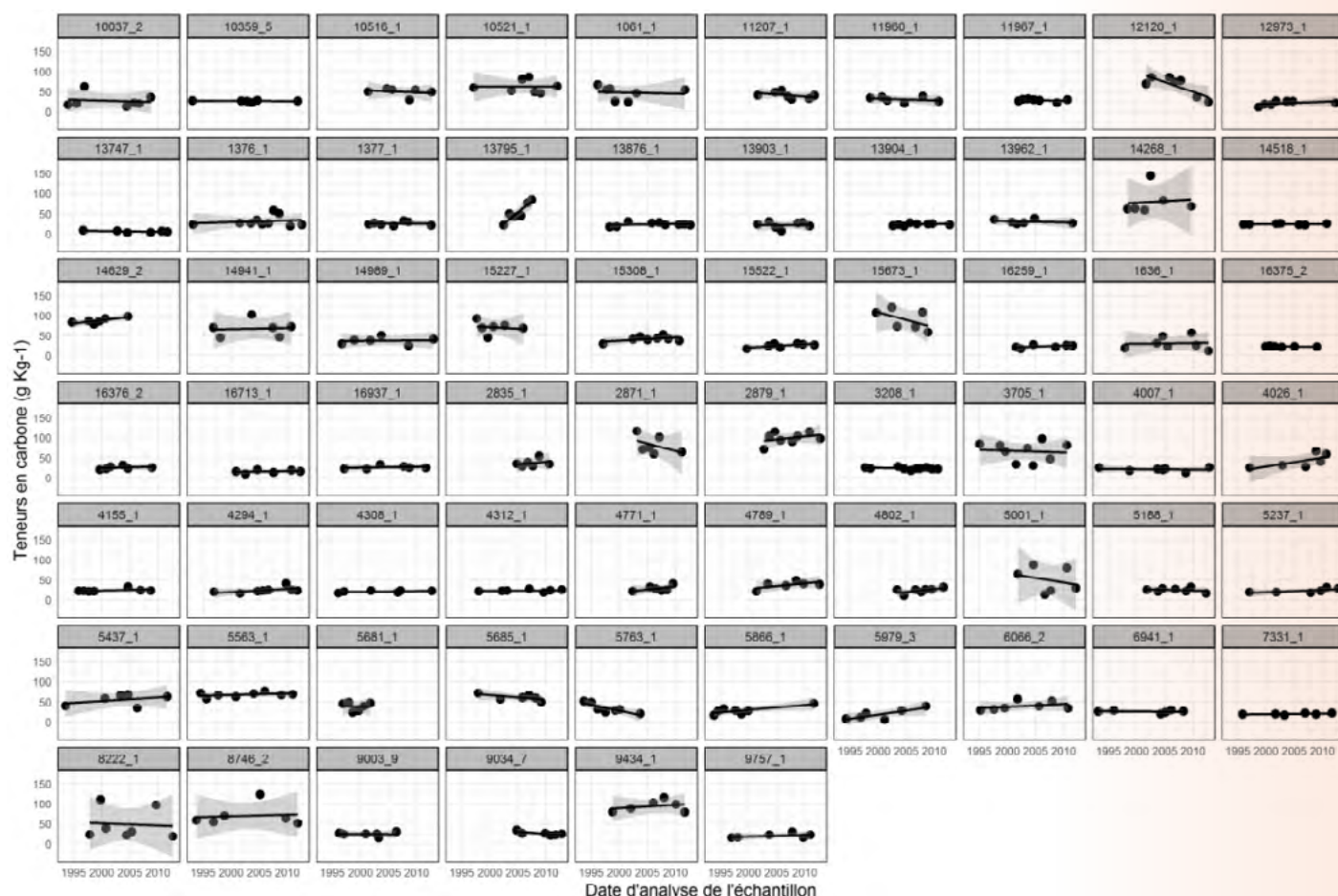


Figure 58 - Évolution temporelle des teneurs en COS d'îlots de canne à sucre, échantillonnés au moins à 6 reprises entre 1993 et 2017. [Allo (2019)]

à sucre, considérées comme l'usage de référence et présentant des stocks de COS à l'équilibre, vers les autres usages agricoles de La Réunion, que sont les prairies, le maraîchage, l'arboriculture, et les cultures d'ananas. L'analyse régionale des stocks de COS selon l'usage et le type de sol ne permet pas d'évaluer l'effet de changements d'usage sur les stocks de COS.

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

En faisant l'hypothèse que les stocks de COS sont également à l'équilibre dans les usages autres que la canne, les différences de stocks de COS sont attribuées à un effet du changement d'usage de la canne vers l'autre usage identifié. 13 paires d'usages dans différentes unités pédoclimatiques ont été identifiées comme ayant des différences de stocks de COS significativement différentes de 0 (Figure 58) ; ces transitions concernent les cultures d'ananas, de maraîchage, et les prairies.

La quasi-totalité des transitions de la canne vers les autres usages

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

Les nombres entre parenthèses sur l'axe des ordonnées correspondent au nombre d'échantillons des usages autres que la canne dans cette unité pédoclimatique. Les nombres entre parenthèse au-dessus des points du graphique correspondent à la variation en % du stock de COS sous canne à sucre. La minéralogie dominante des types de sols identifiés par un numéro est décrite en Tableau 16. Les abréviations des climats (classification GIEC) sont les suivantes : TD pour Tropical Dry, TM pour Tropical Moist, TW pour Tropical Wet.

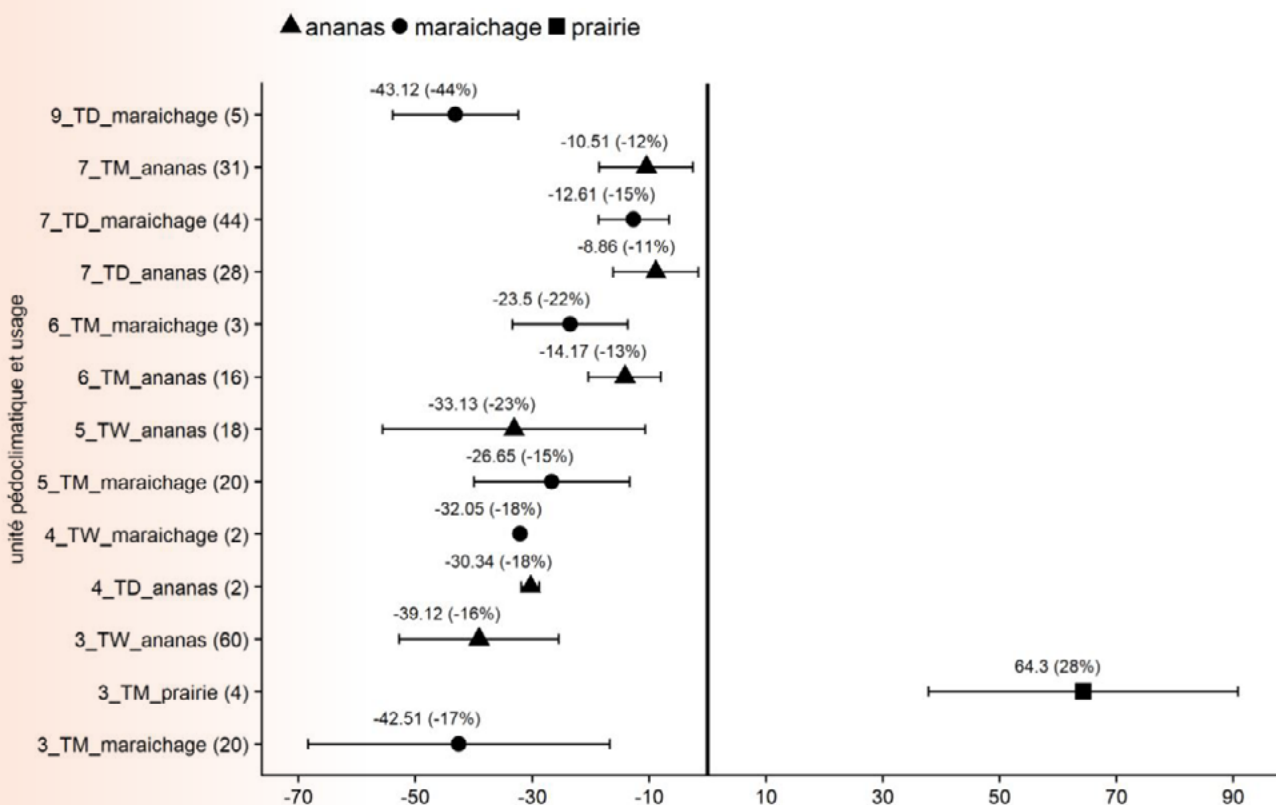


Figure 59 - Différences moyennes de stocks de COS sur 0-30 cm de profondeur entre les cultures de canne et d'autres usages, significativement différentes de zéro, par unité pédoclimatique. [Allo (2019)]



EFFET DES PRATIQUES DE GESTION DANS LES CULTURES PÉRENNES

L'effet des pratiques de gestion sur les variations de stocks de COS dans les cultures de canne à sucre n'a pas fait l'objet d'études spécifiques à La Réunion. Les pratiques conventionnelles de gestion peuvent être déjà considérées comme conservatoires vis-à-vis du COS. Le sol est en effet rarement travaillé (en moyenne tous les 10 ans au moment de la replantation), et la gestion des résidus de culture favorise le maintien des stocks de

COS, bien que le type de récolte influence la quantité de résidus laissés au sol (Pouzet et al. (2002)). Les apports de carbone arrivant au sol sont donc variables, d'autant que la fertilisation azotée entraîne une diminution des quantités de carbone arrivant au sol par les racines, comparé à un témoin non fertilisé (Versini et al. (2020)). Les interactions entre pratiques de gestion, apports de carbone arrivant au sol et dynamique du COS sous canne à sucre n'ont cependant pas été spécifiquement étudiées à La Réunion.



EFFET DES APPORTS DE PRODUITS RÉSIDUAIRES ORGANIQUES

1 Effet sur les stocks de COS

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

Les recherches sur l'effet de ces apports sur la dynamique du COS portent sur les variations quantitatives de stocks de COS mais également sur la distribution verticale du COS, et sur la stabilité du carbone issu des PRO (thèses de Louis-Axel Edouard Rambaut et Floriane Jamoteau). Les données disponibles actuellement concernent l'effet d'apports de PRO sur les stocks de COS, qui a été étudié sur 9 sites expérimentaux à La Réunion, occupés par

des prairies permanentes, des parcelles de maraîchage ou de la canne à sucre (Jamoteau (2018) ; Viaud (2019)). Ces essais couvrent une grande diversité de cultures, de climats, de sols et de PRO (Tableau 18). Des apports importants de PRO sont effectués chaque année dans ces essais (de 0,3 à 19,8 tC/ha/an, avec une moyenne de 5,3 tC/ha/an).

Le suivi des stocks de COS est diachronique, les stocks de COS ont été mesurés au début de l'expérimentation, puis à un pas de temps annuel durant toute la durée de l'essai, sur la couche supérieure du sol (0-15 cm en prairie et canne, 0-30 cm sur le site des Colimaçons). Sur l'ensemble des sites, l'augmentation moyenne des stocks de COS est de 1,4 tC/ha/an (variant de 0 à 6 tC/ha/an).

Sites	Durée [an]	Altitude [m]	Pluviométrie [mm/an]	Type de sol	Culture	PRO apportés
FR Saint Joseph	15	10	1 250	Arénosol	Prairie	Lisier bovin, Compost fumier bovin
FP Montvert	15	800	1 250	Andosol	Prairie	Lisier bovin, Compost fumier bovin
FP Plaine des Cafres	15	1 600	1 750	Andosol	Prairie	Lisier bovin, Compost fumier bovin
Colimaçons	18	800	1 250	Cambisol andique	Maraîchage	Compost lisier porc, Compost fumier volaille
SOERE La Mare	7	65	1 400	Nitisol	Canne à sucre	Lisier porc, Boues STEP, Litière volaille
TERO La Mare	7	65	1 400	Nitisol	Canne à sucre	Boues STEP, Lisier porc, Litière volaille, Ecumes distillerie, Compost déchet vert, Engrais organique
TERO Piton Saint-Leu	6	570	1 250	Cambisol andique	Canne à sucre	Boues STEP, Lisier porc, Litière volaille, Ecumes distillerie, Compost déchet vert, Engrais organique
TERO Saint-Benoît	5	326	4 000	Andosol	Canne à sucre	Lisier porc, Fiente poule, Ecume distillerie, Digestat méthanisation
TERO Saint-Louis	4	182	750	Cambisol	Canne à sucre	Lisier porc, Fiente poule, Ecume distillerie

Tableau 20 - Caractéristiques des sites d'étude amendés par des produits résiduels organiques (PRO).

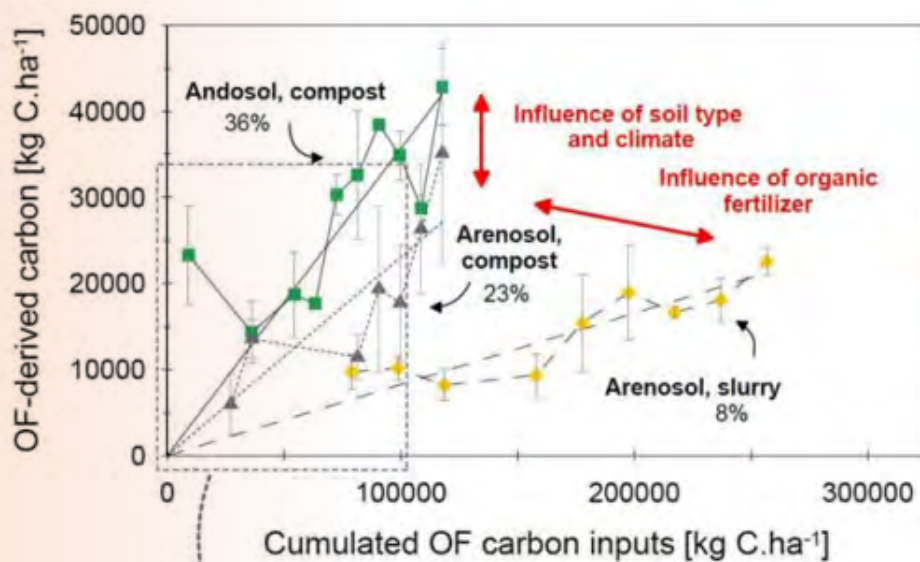
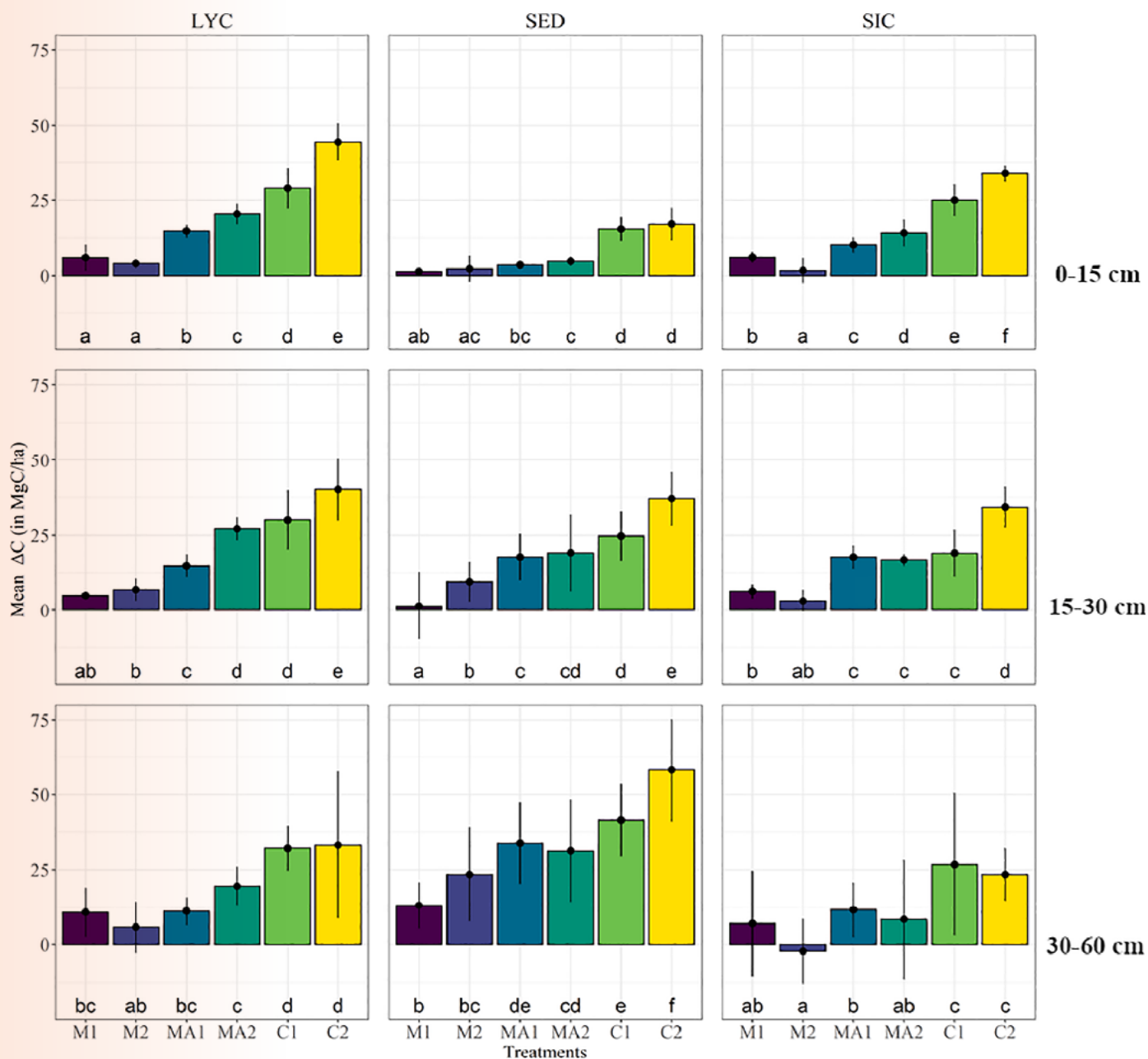


Figure 60 - Accumulation du carbone issu des amendements organiques dans les sols en fonction des quantités de carbone apportées par ces amendements. (Jamoteau et al., [2021]). Slurry = lisier ; OF = Organic fertilizers

Figure 61 - Différence moyenne des stocks de carbone à trois profondeurs du sol après 15 ans d'apports d'engrais (M1, M2), de fumiers (Ma1, Ma2) et de composts (C1, C2), relativement à un témoin non fertilisé, dans trois sites de prairie de l'île de La Réunion (LYC, SED, SIC). Les barres d'erreur indiquent l'écart-type et des lettres différentes indiquent une différence significative entre les traitements pour chaque couche de sol, montrée par un test de Tukey d'une Anova à sens unique. (Edouard-Rambaut et al. [2022]).



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

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

Le suivi de l'accumulation du carbone issu des amendements organiques dans les sols met en évidence plusieurs tendances (Figure 59). D'une part, à quantité équivalente de carbone apportée, la quantité de carbone incorporé dans le sol est plus importante dans l'Andosol que dans l'Arénosol : ce résultat souligne l'importante capacité des Andosols, riches en allophanes, à stabiliser du carbone. Les conditions climatiques pourraient également expliquer en partie cette tendance, avec des conditions de température plus fraîches dans le cas de l'Andosol, ralentissant la minéralisation de la matière organique. D'autre part, pour un même type de sol et à quantité d'apport équivalent, la quantité de carbone incorporé dans le sol diffère selon le type d'amendement. L'apport de compost per-

met une plus grande incorporation du carbone dans le sol comparé au lisier, comme vu précédemment.

Dans une étude plus récente menée sur les mêmes sites de prairie, un bilan de masse réalisé jusqu'à 60 cm de profondeur a révélé qu'une part considérable du carbone apporté avec les PRO était recouverte dans les horizons inférieurs 15-30 cm et 30-60 cm (Edouard-Rambaut et al. (2022)). Ce résultat rappelle l'importance de tenir compte des horizons profonds non seulement pour établir des stocks de carbone mais également afin d'évaluer leur potentiel de stockage additionnel dans le cadre de changements de pratiques.

2 Effet sur les émissions de N_2O

L'effet de l'apport d'amendements organiques dans des cultures de canne à sucre sur les émissions de N_2O et CO_2 a été étudié sur un site expérimental à La Réunion (SOERE PRO, site de La Mare, Sainte-Marie) (Kyulavski et al. (2019) ; Kyulavski (2019)). Plusieurs types d'apports ont été testés (urée, lisier de porc, boues de stations d'épuration) en combinaison avec deux modalités d'apport en mulch de résidus de canne (5 vs 10 $\text{Mg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ de matière sèche). La décomposition du mulch de canne n'a pas été affectée par l'apport de fertilisant (Kyulavski et al. (2019)). Les émissions de N_2O associées aux apports de fertilisants décroissent dans l'ordre lisier de porc > urée > boues de stations d'épuration (Figure 61). La forme liquide des amendements organiques favoriserait donc les émissions de N_2O .

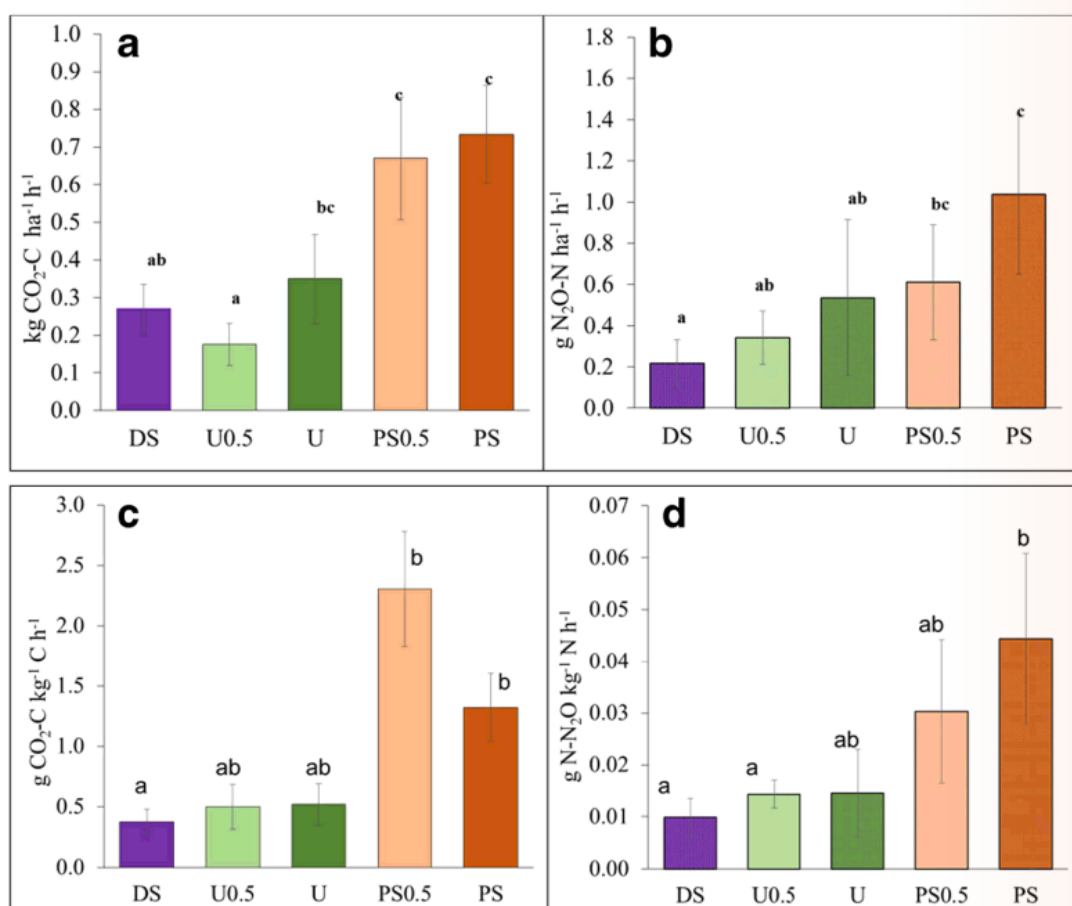


Figure 62 - Émissions de CO_2 et N_2O jusqu'à 14 jours après application de fertilisants azotés sur des cultures de canne à sucre [Kyulavski et al. (2019)]. Flux absolus moyens de $\text{CO}_2\text{-C}$ (a) et de $\text{N}_2\text{O-N}$ (b) et flux moyens absolus normalisés de $\text{CO}_2\text{-C}$ (c) et de $\text{N}_2\text{O-N}$ (d) au cours des 14 premiers jours suivant l'application de N pour 10 t MS ha^{-1} de pailis + urée (U), 10 t MS ha^{-1} de pailis + lisier de porc (PS), 10 t de MS ha^{-1} de pailis + boues d'épuration (DS), et 5 t DM ha^{-1} de pailis + urée (U0,5), 5 t DM ha^{-1} de pailis + lisier de porc (PS0,5). Les émissions normalisées ont été calculées par unité de C ou de N initialement ajouté. Les barres sur le graphique indiquent les erreurs standard à la moyenne ($n = 3$). Les mêmes lettres au-dessus des barres n'indiquent aucune différence significative à $p = 0,05$

Déterminants socio-économiques des stocks de carbone du sol

Usages des sols agricoles et forestiers : état des lieux

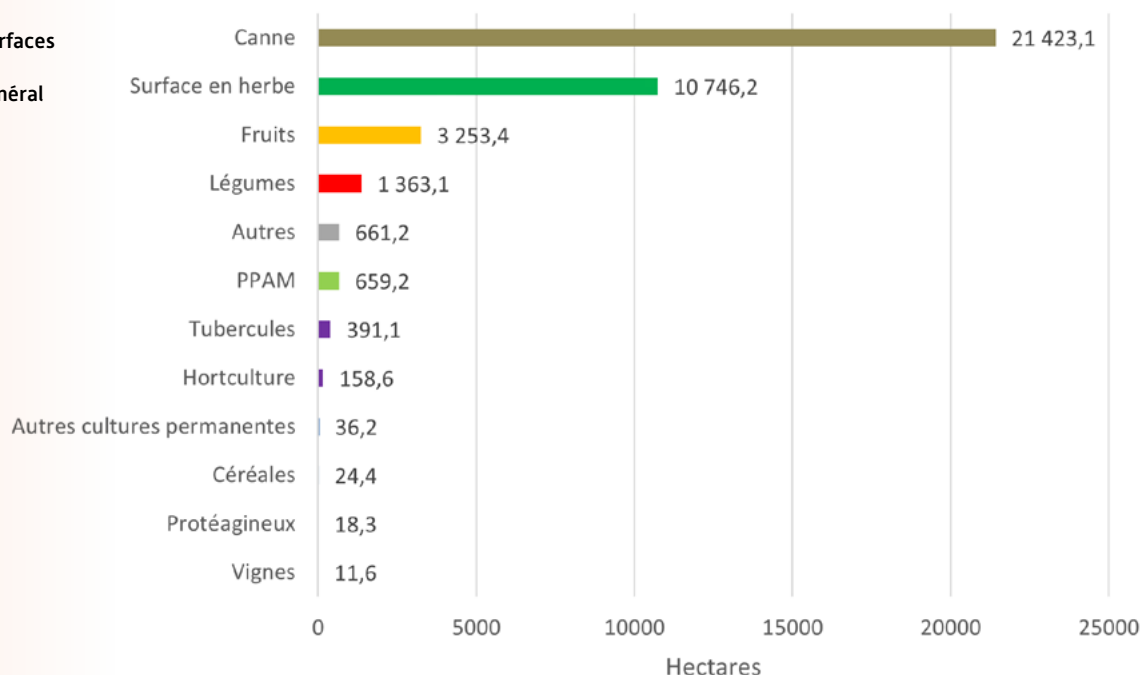
Les surfaces agricoles de l'île de La Réunion sont principalement destinées à la culture de canne à sucre et à l'élevage. Les fruits et légumes représentent les deux autres spéculations les plus pratiquées, mais avec un poids surfacique large-

ment inférieur (Figure 62). Suivant cette logique, on constate une forte spécialisation dans la culture de la canne à sucre, des légumes et fruits tropicaux (ananas, mangue, litchi).



Paysage agricole et montagneux de La Réunion [crédit photo : J. Demenois]

Figure 63 - Usages des surfaces agricoles à la Réunion.
Source : Recensement Général Agricole 2020



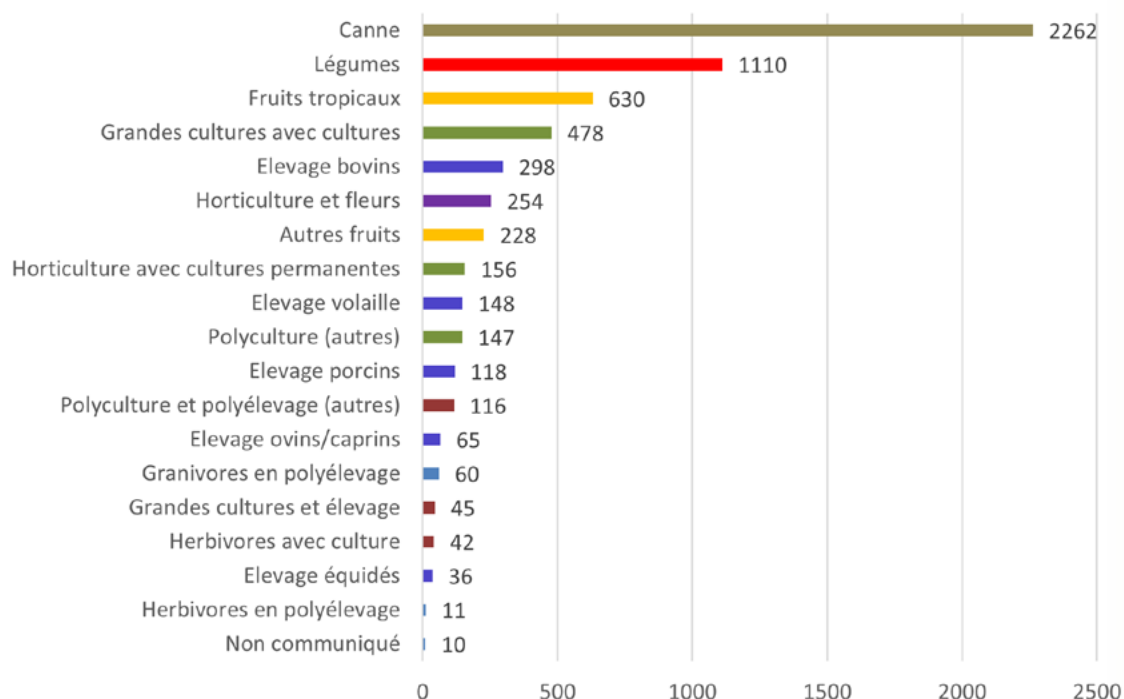


Figure 64 - Orientation productive et spécialisation des exploitations agricoles de La Réunion. Chiffres exprimés en nombres d'exploitations. Source : Recensement Général Agricole 2020

Pratiques agricoles (dé)stockantes : niveau de mise en œuvre

On constate une situation assez comparable à celle de la Guadeloupe et de la Martinique, mais avec un niveau de transition agroécologique qui semble plus avancé. En effet, la pratique du labour profond ne concerne « que » 25 % des

exploitations et le labour réduit ainsi que le semis direct sont plus développés. L'adoption de modes de fertilisation avec effluents animaux et compost concernent plus de la moitié des exploitations.

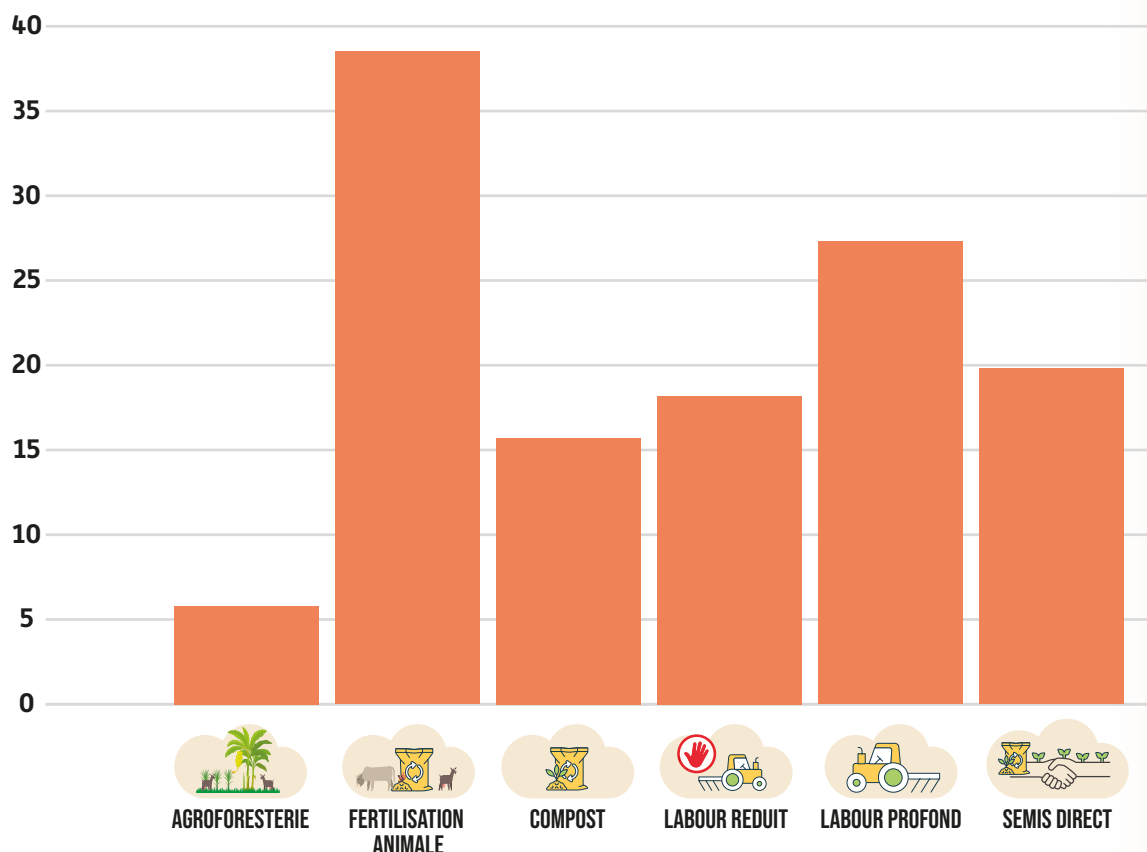


Figure 65 - Taux d'adoption [% des exploitations] des pratiques ayant une influence sur les stocks de carbone des sols agricoles à La Réunion. Source : Recensement Général Agricole 2020

Déterminants socio-économiques de l'adoption



AGROFORESTERIE

Cette pratique, peu courante à La Réunion (5,8 % des exploitations), semble mise en œuvre préférentiellement par des exploitations agricoles de forte dimension économique qui sont largement inscrites dans une démarche agroécologique (label Agriculture Biologique, commercialisation en circuit court).



FERTILISATION AVEC EFFLUENTS ANIMAUX

Cette pratique est répandue puisqu'elle concerne près de quatre exploitations sur dix. Aucun type précis d'exploitation ne ressort comme utilisant significativement et spécifiquement la fertilisation animale. On peut donc supposer des transferts d'effluents entre exploitations au sein du territoire. Avoir des pratiques agroécologiques, une forte dimension économique, être « moderne » (gestion numérisée de l'exploitation, insertion dans des réseaux agricoles, mobilisation de circuits courts) est positif, à l'inverse de la faible dimension économique et l'absence de ressources animales sur l'exploitation agricole.



FERTILISATION AVEC COMPOST

Cette pratique semble liée à la spécialisation en culture de fruits tropicaux et en horticulture, ainsi qu'à un niveau de formation élevé.



Paysage de prairie dans la plaine des Cafres (crédit photo : J. Demenois)



LABOUR PROFOND

Cette pratique concerne plus d'une exploitation agricole sur quatre (27,3 %) et concerne tous les types avec culture (hors fruits) ainsi que les agriculteurs qui ont un faible niveau d'études et dont l'exploitation ont une grande dimension économique (production brute standard PBS > 50k€).



LABOUR RÉDUIT

Le labour réduit, adopté par 18,2 %, des exploitations, concerne essentiellement les exploitations engagées dans la culture de légumes. Là aussi, ce sont les variables témoignant d'un engagement dans une démarche agroécologique (fertilisation organique, pratiques de cultures intermédiaires) et aussi le fait d'être membre d'une organisation de producteurs qui sont les plus favorables au labour réduit. Cette pratique semble plus liée à une démarche individuelle (conscience agroécologique) qu'à des éléments structurels.



SEMIS DIRECT

Le semis direct concerne une exploitation sur cinq (19,8 %), bien entendu celles qui cultivent des végétaux (sauf fruits), notamment les exploitations spécialisées (légumes, horticulture), et pas celles orientées vers l'élevage. Parmi les autres facteurs positifs d'adoption, ressortent le fait d'être labellisé en Agriculture Biologique, l'utilisation du numérique pour la gestion des cultures, le fait d'être membre d'un groupe d'échanges et le recours à la commercialisation en circuits courts.



Installation des équipements de mesures des gaz à effet de serre sur le dispositif SOERE PRO à La Réunion (crédit photo : J. Demenois)

Enjeux et pistes de réflexion pour La Réunion

Les travaux réalisés à La Réunion sur le stockage de COS font émerger plusieurs tendances à prendre en compte dans une perspective de séquestration du COS sur ce territoire. D'une part les stocks de COS dans les sols agricoles sont élevés, en particulier dans les sols andiques et cultivés en canne à sucre. Cet usage est majoritaire dans le territoire agricole réunionnais, et permet de maintenir les stocks de COS à l'équilibre avec les pratiques conventionnelles actuelles.

Les stocks de COS agricoles sont sensibles aux changements d'usage : la transition des cultures de canne à sucre vers des cultures maraîchères et d'ananas provoque une diminution significative des stocks de COS, plus importante si les sols sont andiques. Les limites méthodologiques de l'évaluation des effets des changements d'usage sont constituées par l'absence de prise en compte des changements éventuels de la densité apparente à la suite du changement d'usage, et l'absence de données sur l'âge des transitions étudiées. Une alternative aux nombreux travaux du sol utilisés en cultures maraîchères et d'ananas sera la bienvenue afin de diminuer les pertes en carbone occasionnées, lors de ces travaux, par minéralisation et/ou érosion.

Le levier principalement étudié à La Réunion pour maintenir ou augmenter les stocks de COS agricoles est l'apport d'amendements organiques, d'origine agricole ou urbaine. Le développement d'une économie circulaire valorisant les déchets doit permettre d'augmenter les volumes des produits organiques à destination de l'agriculture, cette augmentation étant nécessaire pour maintenir les stocks de carbone de sols agricoles.

Mais il convient de ne pas oublier que si les stocks de carbone diminuent sous des cultures maraîchères et d'ananas, ceux-ci pourraient augmenter si la culture de canne à sucre était réimplantée sur ces mêmes parcelles et, avec une restauration des stocks de carbone (au rythme de 1 à 2 tC/ha/an) au bout de deux décades.

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

- Les stocks de COS calculés à l'échelle régionale à partir de la base de données du Cirad ne prennent pas en compte la teneur en éléments grossiers, ce qui entraîne une surestimation des stocks de COS pour les sols peu évolués du sud-est de l'île, où la proportion massique d'éléments grossiers atteint en moyenne 35%. Des travaux sont actuellement en cours pour améliorer la qualité des données dans ces situations.
- La base de données étudiée dans le projet C@RUN contient peu d'analyses de sols cultivés en arboriculture ; par conséquent, l'effet des transitions entre les systèmes de canne vers ces systèmes n'a pu être évalué, et l'effet des pratiques de gestion dans les vergers sur les stocks de COS n'a pas été étudié par ailleurs. Ces cultures pourraient pourtant être amenées à se développer dans les prochaines décennies si des politiques publiques favorables à l'autonomie alimentaire sont menées. Marzin et al. (2021) ont estimé à environ 250 ha les surfaces à mettre en culture pour atteindre l'autonomie alimentaire en matière d'agrumes.
- L'absence de données sur l'état des stocks de COS dans les forêts des Hauts de l'île empêche l'évaluation des changements de stocks de COS liées à la déforestation et l'installation de pâturages. 121 km² de forêts et espaces mixtes ont été convertis entre 1989 et 2002, majoritairement au profit de pâturages dans les Hauts (Lagabrielle et al. (2007)).
- L'effet des pratiques de gestion dans les systèmes maraîchers sur les trajectoires des stocks de COS a été peu étudié à La Réunion, hormis l'effet de la fertilisation organique sur le site des Colimaçons. Bien qu'elles aient progressé au cours de la dernière décennie, les superficies des systèmes maraîchers sont encore modestes (environ 2000 ha en 2018).

Chambres de mesure des gaz à effet de serre sur le dispositif SOERE PRO à La Réunion (crédit photo : J. Demenois)



Principaux déterminants des stocks de carbone du sol et leur spatialisation

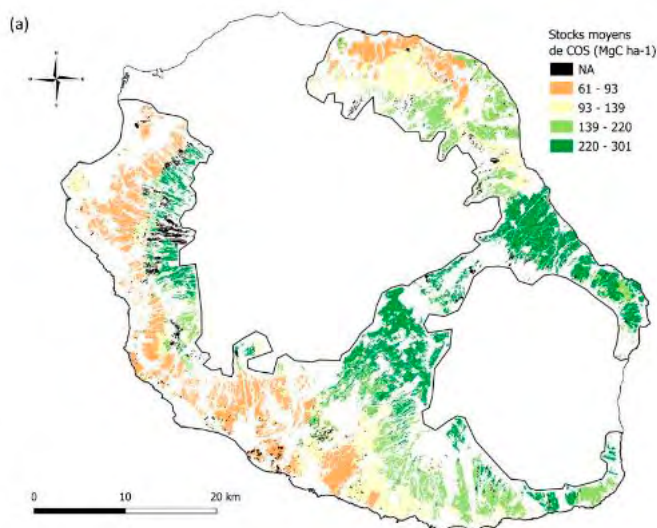
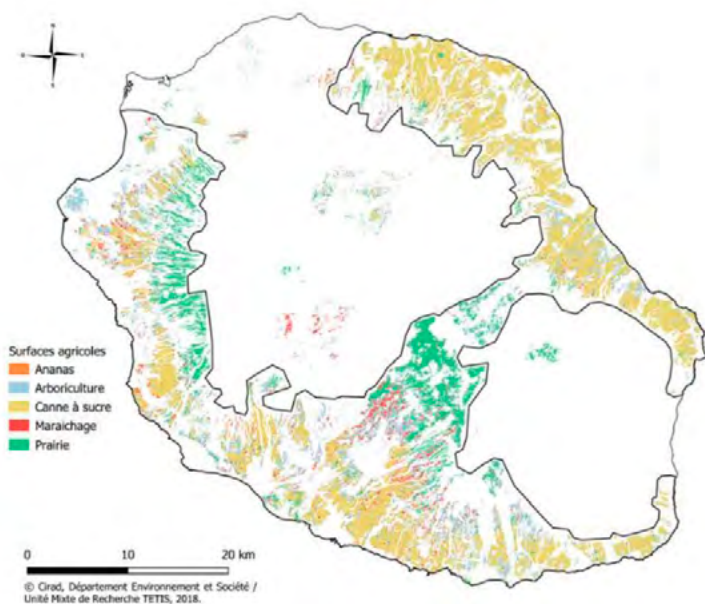
La diversité des sols est forte à La Réunion. Et la variabilité spatiale de la distribution des sols est importante en raison de la variété des roches volcaniques affleurantes, de leur âge, et des gradients de température et de précipitations qui résultent du relief de l'île. Cette spécificité des îles volcaniques est plus marquée ici qu'aux Antilles car liée à la jeunesse de l'île, donc de l'orographie qui contrôle la variabilité spatiale des climats.

Les principaux types de sols sont :

1. **Les sols andiques et andiques perhydatés** (Andosols dans la classification WRB) sont des sols formés sur des dépôts volcaniques récents, dans des régions fraîches d'altitude et/ou très arrosées ;
2. **Les sols bruns** (Cambisols dans la classification WRB) formés sur des dépôts volcaniques anciens, dans des conditions bien plus sèches que les sols andiques ;
3. **Les sols ferrallitiques** (Ferralsols dans la classification WRB) situés sur des dépôts encore plus anciens et soumis à une altération plus importante due aux précipitations abondantes ;
4. **Les sols vertiques** (Vertisols) sont ponctuellement présents dans l'ouest de l'île, là où les précipitations sont faibles.

La Réunion est une île volcanique, constituée de deux grands massifs : le massif du Piton des Neiges, le plus ancien (environ 2,5 millions d'années) ; le massif du Piton de la Fournaise, plus récent (-0,5 million d'années), encore actif.

Le climat de La Réunion est tropical, mais est fortement influencé par l'orographie et le sens des vents dominants. Le fort gradient altitudinal (de 0 à 3000 m) induit une variabilité importante de la température moyenne à l'échelle de l'île.



Stocks de carbone du sol à La Réunion (Allo, 2019)

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

Sur l'ensemble du territoire agricole, plus de la moitié du stock de carbone du sol total est contenu dans les sols andiques et près de la moitié du stock de carbone du sol total est contenu dans les sols cultivés en canne à sucre. Les prairies ne couvrent que 16% du territoire agricole, mais contiennent 26% du stock de carbone du sol total. Au total, les sols agricoles réunionnais contiennent 7,6 millions de tonnes de carbone.

Il a été montré que tous les usages des terres, hors prairie, diminuent fortement (30%) les stocks de carbone par rapport à l'usage de référence, la canne à sucre, dans diverses conditions pédologiques et climatiques.

À La Réunion, les pratiques agricoles les plus étudiées, dans le cadre de la dynamique du carbone dans les sols agricoles sont celles qui concernent les apports de produits résiduels organiques (PRO), en raison du contexte insulaire et de l'opportunité de ces PRO à se substituer partiellement aux engrais chimiques importés (Jarousseau et al., 2016).

Ces travaux couvrent une diversité de culture, de climats, de sols et de PRO. Des apports importants de PRO sont effectués chaque année dans ces essais (de 0,3 à 19,8 tC/ha/an, moyenne de 5,3 tC/ha/an). Sur l'ensemble des sites, l'augmentation moyenne des stocks de carbone du sol est de 1,4 tC/ha/an (variant de 0 à 6 tC/ha/an). Dans l'ensemble des situations, l'apport de PRO sous forme de compost entraîne une augmentation des stocks de carbone du sol supérieure aux situations où le PRO est apporté sous forme de lisier.

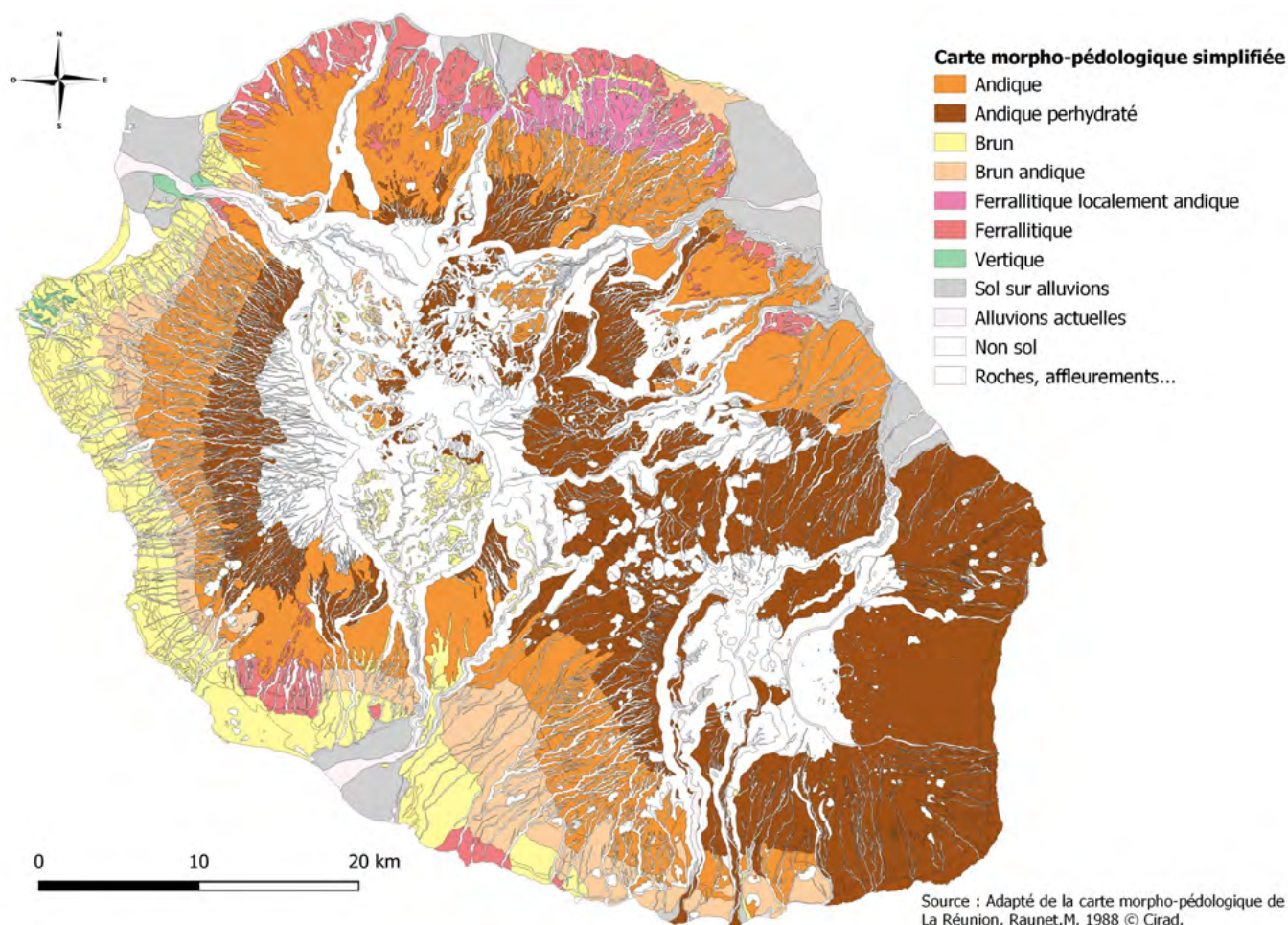
Enjeux et pistes de réflexion sur le stockage de carbone dans les sols de La Réunion

Les travaux réalisés à La Réunion sur le stockage de carbone du sol font émerger plusieurs tendances à prendre en compte dans une perspective de séquestration du carbone du sol sur ce territoire. D'une part, les stocks de carbone du sol dans les sols agricoles sont élevés, en particulier dans les sols andiques et cultivés en canne à sucre. Cet usage est majoritaire dans le territoire agricole réunionnais, et permet de maintenir les stocks de carbone du sol à l'équilibre avec les pratiques conventionnelles actuelles.

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

native aux nombreux travaux du sol utilisés en cultures maraîchères et d'ananas sera la bienvenue afin de diminuer les pertes en carbone occasionnées, lors de ces travaux, par minéralisation et/ou érosion. Le levier principalement étudié à La Réunion pour maintenir ou augmenter les stocks de carbone du sol agricole est l'apport d'amendements organiques, d'origine agricole ou urbaine. Le développement d'une économie circulaire valorisant les déchets doit permettre d'augmenter les volumes des produits organiques à destination de l'agriculture, cette augmentation est nécessaire pour maintenir les stocks de carbone de sols agricoles.

Mais ne pas oublier que si les stocks de carbone diminuent sous des cultures maraîchères et d'ananas, ceux-ci pourraient augmenter si la culture de canne à sucre était implantée sur ces mêmes parcelles et, avec une restauration des stocks de carbone... (au rythme de 1 à 2 tC/ha/an) au bout de deux décades...



Présentation du territoire

Au sein de l'étude, la Guyane a été considérée de manière particulière. Au-delà de l'objet principal de l'étude qu'est le carbone du sol, le travail d'inventaire des connaissances de ce territoire inclut également le carbone aérien. En effet, la Guyane est principalement recouverte d'une immense forêt (97,3 % de sa surface) soumise à des changements d'utilisation des terres sous forme de défrichement, notamment au bénéfice de l'agriculture. Cette partie s'organise donc autour de 4 chapitres. Une présentation introductive de la Guyane est suivie d'un chapitre sur les stocks de carbone dans les sols sur l'ensemble du territoire, qui inclut les forêts et les zones non forestières (notamment dédiées à l'agriculture). Un troisième chapitre aborde les stocks de carbone dans la biomasse aérienne (des forêts donc). Un dernier chapitre récapitule les enjeux et propose des pistes de réflexion.

Contexte biophysique

La Guyane française est un département-région d'outre-mer (DROM) de 83 800 km² (le plus grand département français) mais avec la plus faible densité de population (moins de 295 000 habitants en 2022, soit 3,5 habitants/km²). Située sur la côte Atlantique nord du continent sud-américain, entourée par le Suriname à l'ouest (frontière fleuve Maroni) et le Brésil au sud et à l'est (frontière fleuve Oyapock), la Guyane fait partie de la zone géologique du plateau des Guyanes, un massif ancien (2,2 milliards d'années) qui s'étend du Venezuela à l'état brésilien de l'Amapa (BRGM (2011)). Plusieurs paysages se distribuent du nord au sud, avec principalement la plaine côtière à faible altitude (< 30 m) issue des dépôts alluvionnaires fluvio-marins jeunes, des vallées dans l'arrière-côte, le plateau granitique (100 à 200 m d'altitude, maximum 800 m) (Figure 66).

Climat

Le climat de la Guyane (Figure 67) est de type tropical humide. Les précipitations annuelles moyennes de 2 700 mm varient spatialement de 2 000 à 4 000 mm selon un double gradient

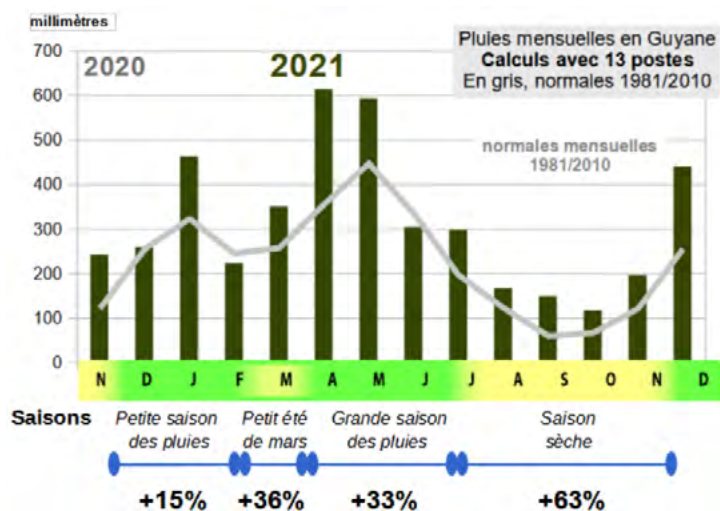


Figure 67 - Histogramme de pluviométrie mensuelle sur l'année 2021.
Source : Météo France

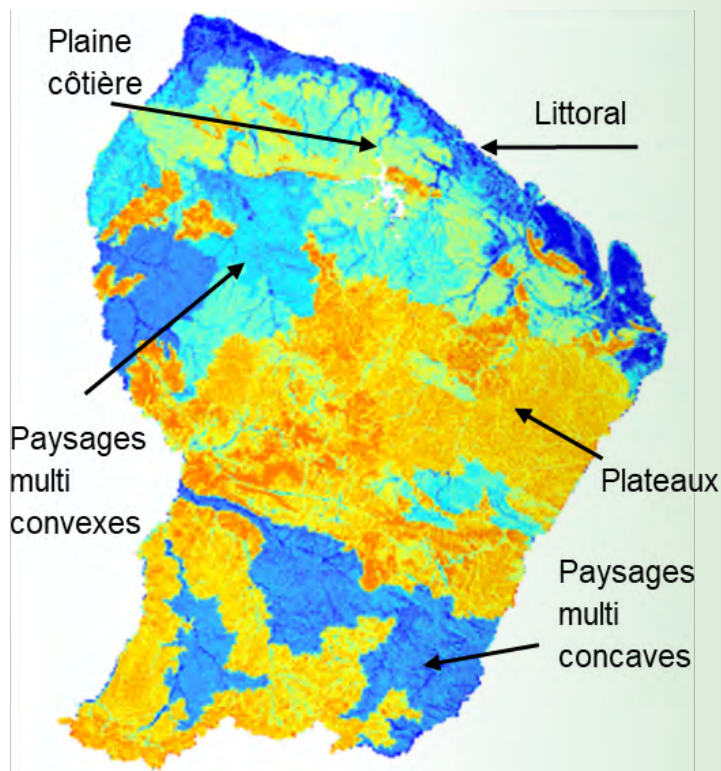


Figure 68 - Répartition des types de sols sur le territoire guyanais par Guitet et al. (non publié).
orange = geric ferralsol ; rouge = autre ferralsol ;
vert = acrisol ; bleu = autre

décroissant de l'est à l'ouest du littoral, et de la bande côtière à l'intérieur des terres. On distingue 4 saisons : petite saison des pluies (décembre-février), petite saison sèche (mars), grande saison des pluies (avril-juillet), grande saison sèche (août-novembre).

Les températures moyennes mensuelles fluctuent peu sur l'année, avec une moyenne annuelle de 27,3°C en 2021 (qui a d'ailleurs augmenté de 1°C depuis 1970).

Typologie des sols

Plusieurs cartes pédologiques ont été produites en Guyane, la majorité sur le littoral, dont une synthèse a été produite dans le cadre du projet CarsGuy (Courte (2019)), en utilisant le système de classification du Référentiel Pédologique. A l'échelle de la Guyane, Guitet et al. (2015) ont proposé une carte de répartition des types de sol (Figure 68) en s'appuyant sur les paysages géomorphologiques et en utilisant le système de classification internationale WRB (World Reference Base for Soil Resources).

En Guyane, les Ferralsols, sols typiques des milieux tropicaux, sont majoritaires sur les plateaux. Ils sont en partie remplacés par les Acrisols dans la plaine, les vallées côtières et les reliefs multi-convexes du nord-ouest, et aux plus hautes altitudes des reliefs multi-concaves du sud. Une diversité de sols (Cambisols, Plinthosols, Ferralsols, Acrisols, Gleysols) caractérise le littoral et les autres parties des reliefs multi-concaves du sud.

Contexte agricole et forestier

Selon la FAO (FRA2020), la surface forestière couvre 97,3% du territoire de la Guyane. Elle se classe en 4 grandes familles d'habitats (Guitet et al. (2015)) : les forêts des plaines et dépressions, les forêts des collines, les forêts des plateaux et hauts reliefs, les forêts des zones marécageuses et les mangroves (0,6 % de la surface forestière). Les mangroves reposent sur des dépôts de vase dont la dynamique d'apparition et de disparition varie au cours du temps (phases d'accrétion et d'érosion de la côte). La forêt guyanaise est parmi les plus riches et les moins écologiquement fragmentées du monde, et constitue le plus grand massif forestier de l'Union européenne (8,1 millions d'ha). Elle présente donc de forts enjeux liés au carbone contenu dans la biomasse forestière. Elle constitue aussi un hotspot de biodiversité. Elle représente donc un enjeu de conservation majeur pour la France et l'Union européenne. Elle est aussi l'objet d'une exploitation forestière sélective qui produit près de 80 000 m³ de grumes chaque année, et alimente le troisième secteur économique de Guyane¹.

La bande côtière guyanaise (Figure 69), située entre Saint-Laurent du Maroni et Saint-Georges de l'Oyapock, couvre globalement 750 000 ha et représente 9 % du territoire (ONF (2017)). Elle concentre plus de 95 % de la population et abrite également

des milieux naturels fragiles spécifiquement inféodés au littoral (savanes, marais, mangroves, ...) et la majorité des terres agricoles. Les savanes occupent 0,2 % du territoire mais constituent un biotope remarquable en constituant 16 % de la flore de Guyane. A noter qu'elles ont perdu 39 % de leur surface depuis 1950 du fait de l'extension de l'urbanisation et de l'agriculture.

En 2020, les exploitations agricoles guyanaises occupaient environ 36 429 ha, soit 0,4 % du territoire ; elles étaient au nombre de 6 135 et employaient 20 600 personnes (Agreste (2020)). L'agriculture guyanaise se caractérise par la coexistence d'une agriculture traditionnelle manuelle itinérante (basée sur de la culture essentiellement vivrière sur brûlis) et d'une agriculture mécanisée à vocation marchande située sur la bande littorale. Les principales productions en termes de surface sont les systèmes herbagers (53 %), les tubercules (22 %), les fruits (17 %), les légumes (5 %) et les céréales (3 %). Les productions animales de la Guyane sont presque exclusivement des productions de viande (bovins viande 61 %, petits ruminants 1 %, porcs 19 %, œufs 16 %, en % du tonnage total) (Agreste (2020)).

I Source DAAF - PRFB

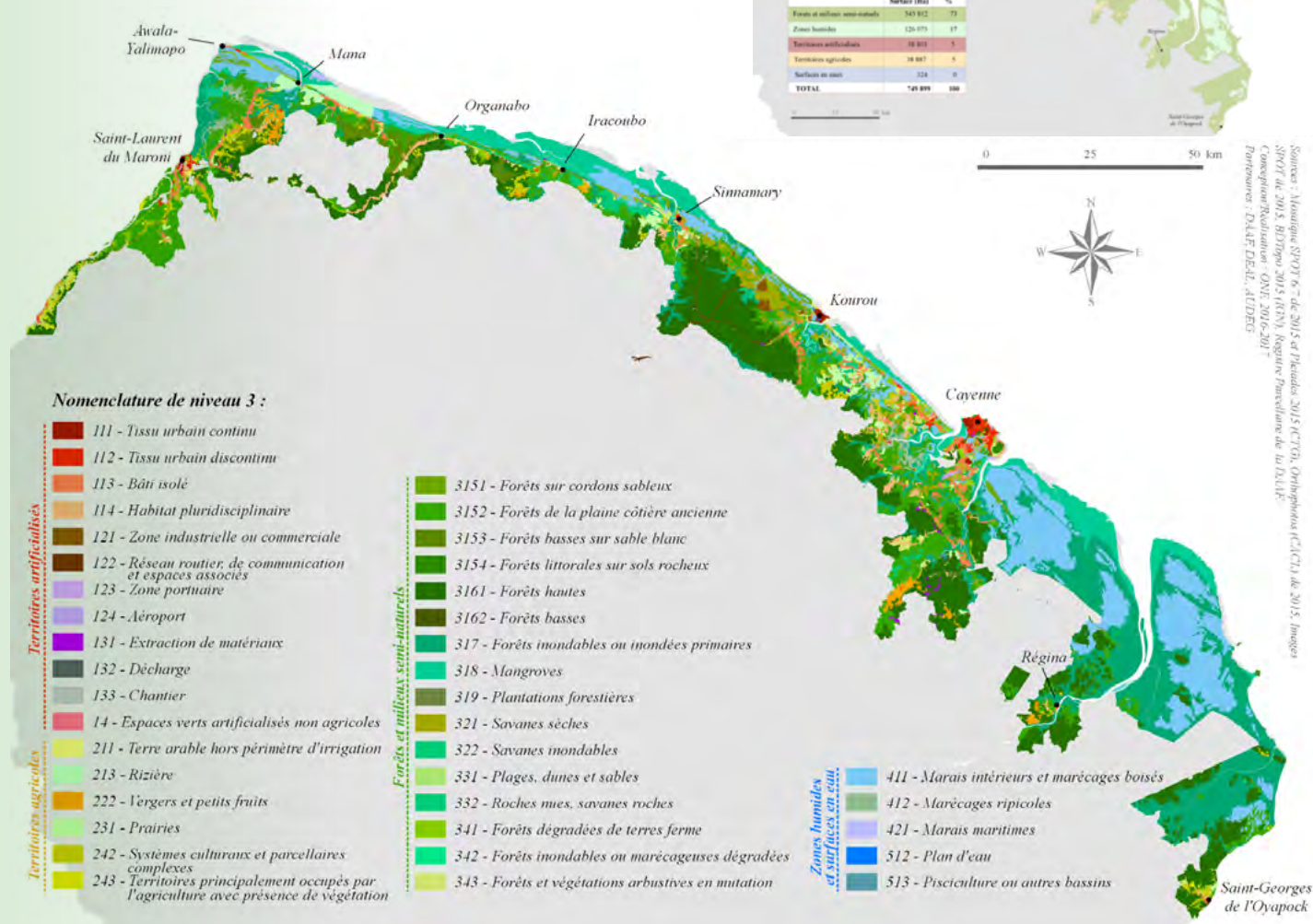


Figure 69 - Carte d'occupation des sols de la côte guyanaise en 2015. Source : Geo.data.gov

Contexte institutionnel

À la différence des autres régions de métropole et d'outre-mer, 90 % du territoire guyanais est sous la propriété de l'Etat (RGA 2010). Le domaine forestier guyanais est essentiellement public, avec un tiers de forêts domaniales, et moins de 1 % géré à titre privé. Le domaine forestier permanent (DFP, 2,4 millions ha) relève du régime forestier et fait l'objet de plans de gestion. Le Parc amazonien de Guyane occupe 3,4 millions d'hectares, le littoral atlantique concentre le cœur des aménagements agricoles, urbains et industriels mais intègre aussi plus de 350 000 hectares de forêts variées ainsi que des mangroves et des plantations gérés par l'ONF. Dans les zones intermédiaires, l'ONF assure une mission de surveillance pour protéger la forêt et ses ressources des activités illégales en forêt telles que l'orpaillage illégal et la coupe de bois sauvage.

L'agriculture constitue un secteur marginal au plan économique (5 % du PIB pour 7 % des actifs) et ne représente que 0,4 % de la surface du territoire (Agreste (2015)). Cependant, sa concentration sur le littoral en fait un élément essentiel de la gestion du territoire. De plus, l'installation des exploitations s'est faite, et se

fait, le plus souvent au détriment de la forêt. L'agriculture joue donc un rôle majeur dans les enjeux liés aux changements d'utilisation des terres et au changement climatique à un niveau régional et européen. La forêt guyanaise représente 120 % des stocks de carbone des forêts de métropole. Par ailleurs, la Guyane est le seul département français qui connaît une augmentation de la SAU et du nombre d'exploitations - respectivement +9 % et +13 % entre 2000 et 2010 (Agreste, RGA, (2010) ; Figure 70).

Autre caractéristique marquante du territoire, la richesse du sous-sol en minerais et particulièrement en or, a entraîné un développement de l'exploitation aurifère à partir des années 1990. Actuellement, on dénombre une vingtaine de mines légales dont l'installation se fait au détriment de la forêt, sur la zone d'exploitation, mais aussi aux alentours pour la construction de routes, de logements, etc. On estime que l'orpaillage a été responsable de la déforestation de 25 000 ha de forêts entre 1990 et 2014, soit 1 000 ha/an (ONF (2015), Lefèbre et Verger (2014) in IGN (2015)). Cette déforestation s'est accélérée entre 2001 et 2015 pour atteindre 1 300 ha/an (Rahm et al. (2015)).

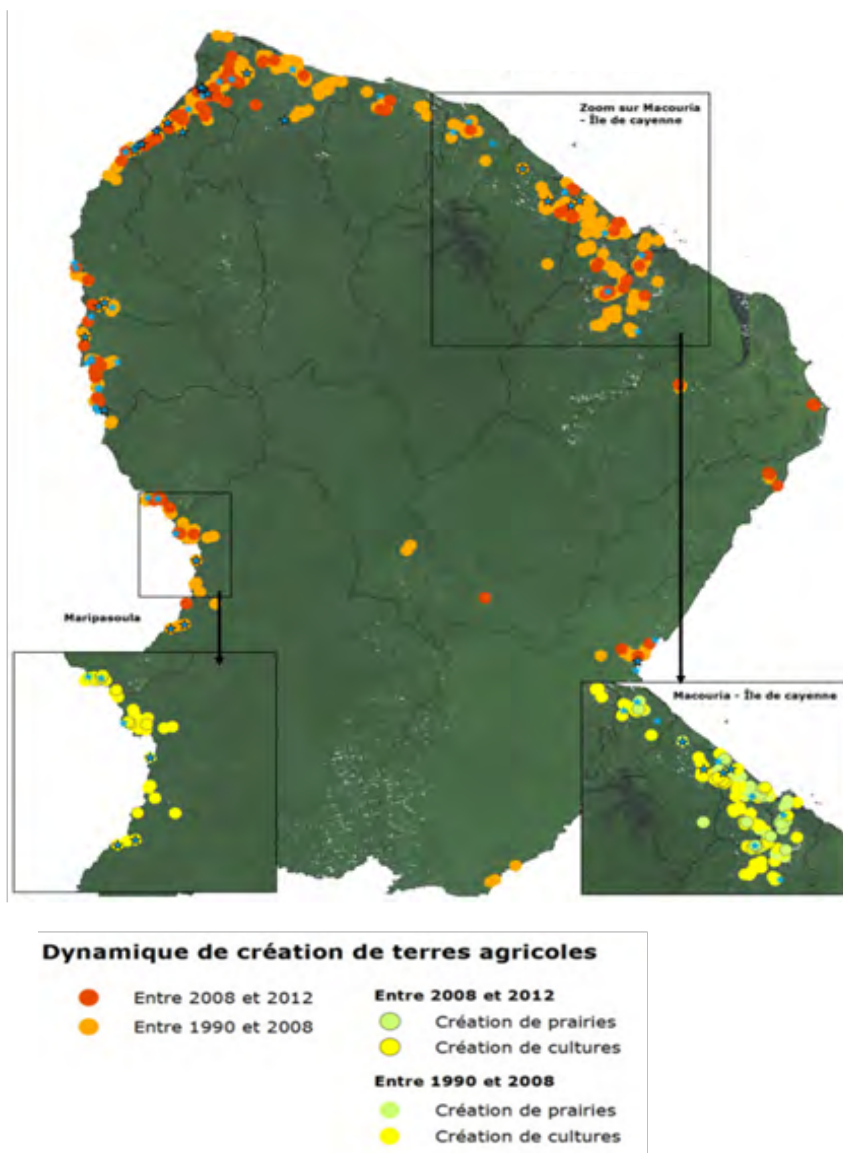


Figure 70 - Dynamique agricole en Guyane entre 1990 et 2012 (ONF Guyane – IGN 2014 in Guyane Energie Climat 2016)

Réalisation d'une fosse pédologique en prairie guyanaise [crédit photo : V. Blanfort]



Mesure de la croissance racinaire dans un sol de pâturage [crédit photo : V. Blanfort]

Stocks de carbone dans les sols et principaux déterminants

Source des données et méthodologie

L'évaluation des stocks de carbone organique du sol (COS) à l'échelle de la Guyane a été réalisée, d'une part, dans le cadre de la thèse de Guitet (2015), et d'autre part, dans le cadre du projet CarsGuy (Courte (2019)). Guitet et al. (2015) ont estimé les stocks de COS sur l'horizon 0-1 m à partir de 33 sites d'étude répartis sur le territoire où ont été réalisés 421 sondages à la tarière rattachés à des types de sol suivant la classification internationale WRB (Figure 71). Les analyses de laboratoire ont porté sur 12 échantillons composites et 25 profils de référence. Des fonctions de pédotransfert ont été utilisées pour estimer la densité apparente, un des paramètres nécessaires pour calculer le stock de COS.

Courte (2019) a estimé les stocks de COS à partir d'analyses de sols de 236 sites situés principalement le long du littoral guyanais et référencés dans 3 bases de données différentes : celles construites dans le cadre du projet CarsGuy (Brossard et al. (2018)), du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) (RMQS-www.gissol.fr) et de la base de données Valsol (Beaudou et Le Martret (2004)) (Figure 72). Des fonctions de pédotransfert ont été utilisées pour estimer la densité apparente qui n'était pas toujours disponible dans Valsol. Finalement, l'agrégation des 3 bases de données, RMQS, CarsGuy et Valsol, a permis d'obtenir les stocks de COS moyens pour différents types de sols suivant la classification du Référentiel Pédologique.

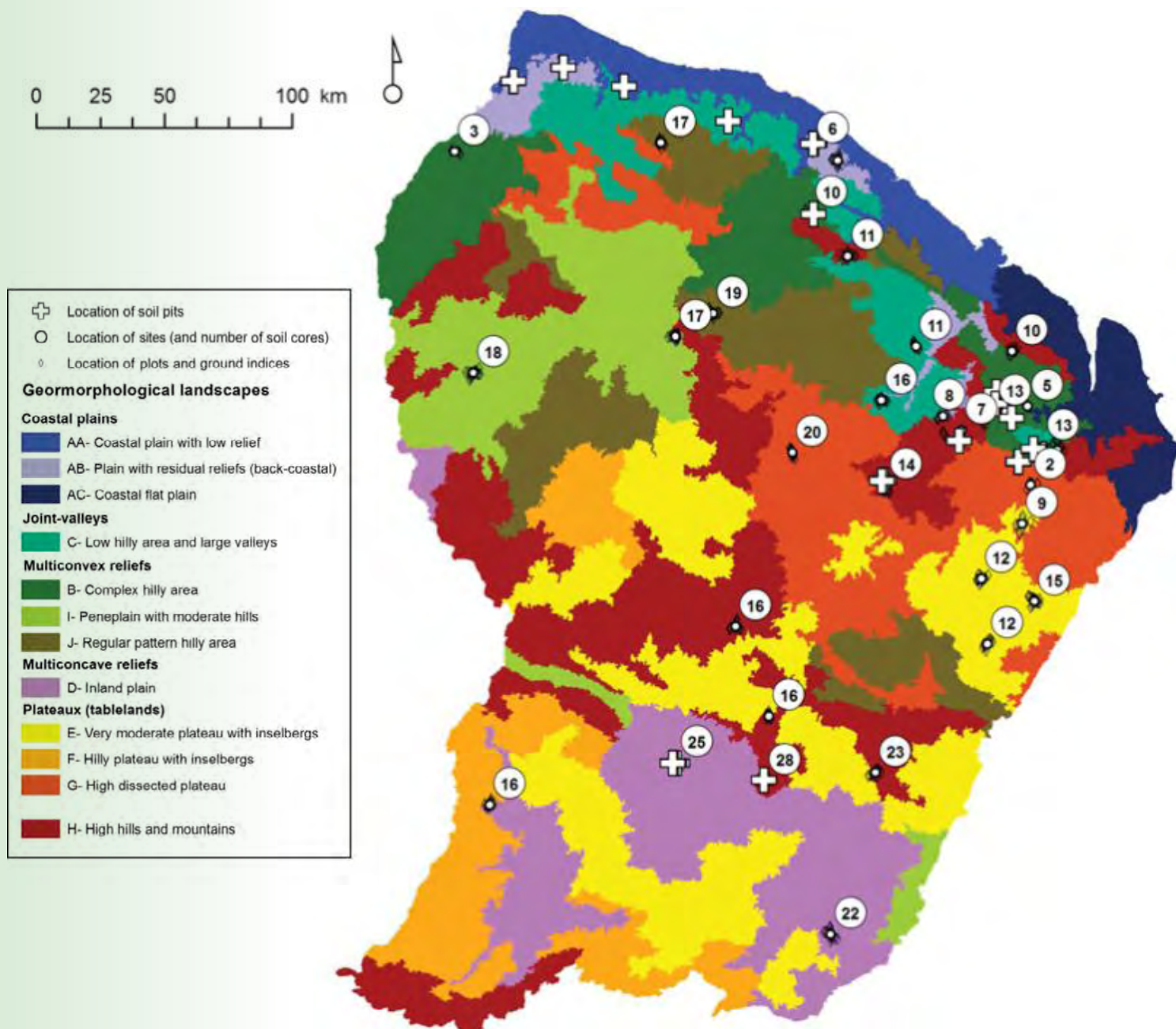


Figure 71 - Carte de répartition des 33 sites des études de Guitet et al. (2015) et Guitet et al. (2016)

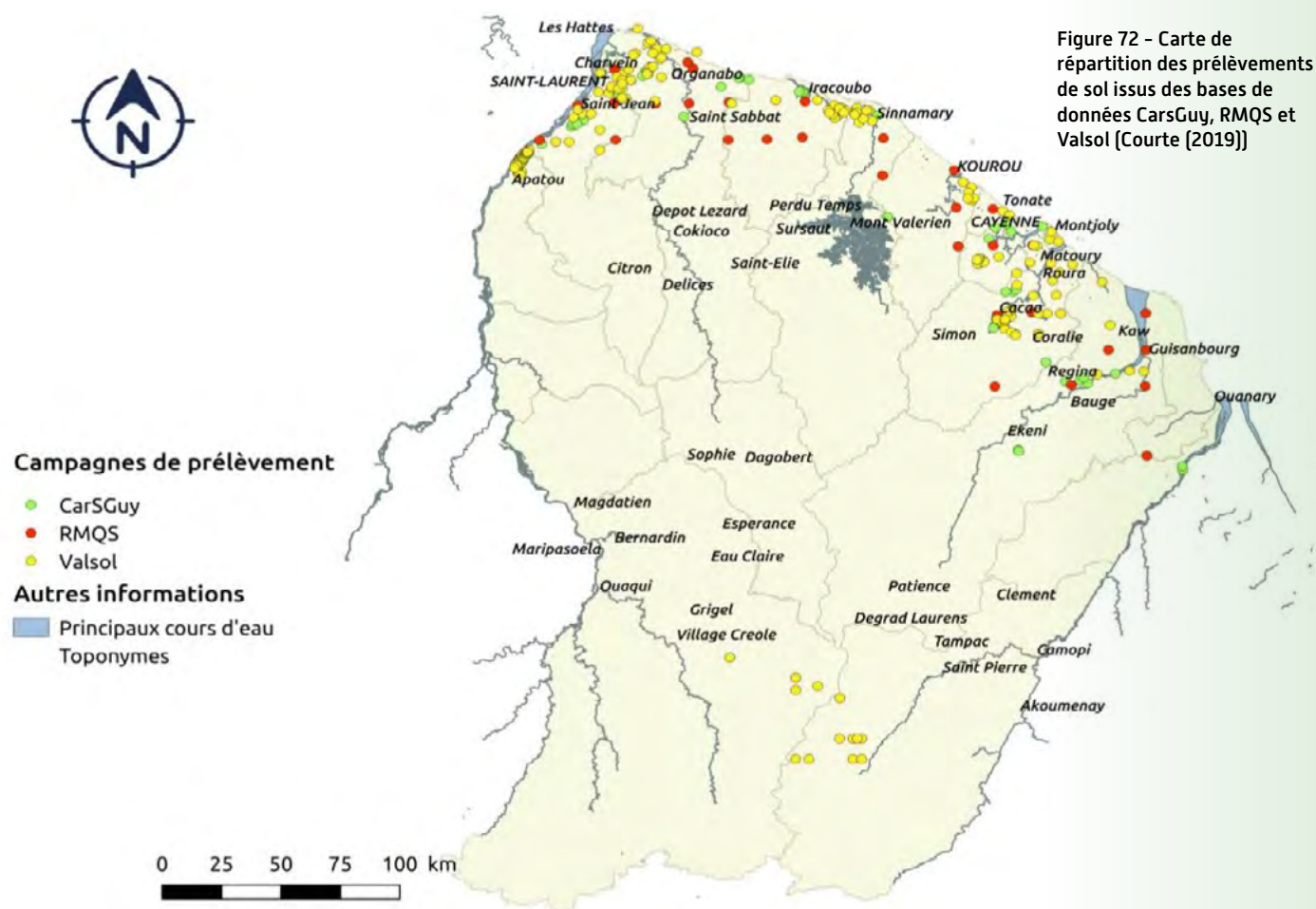


Figure 72 - Carte de répartition des prélèvements de sol issus des bases de données CarsGuy, RMQS et Valsol [Courte (2019)]

Stock de carbone du sol selon le type de sol

Parmi les sols forestiers, Guitet et al. ont trouvé que les Ferralsols présentaient les stocks de COS les plus élevés. Sur le littoral, Courte (2019) a trouvé que les Ferrallitisols, Fluviosols et Rédoxisols présentaient les stocks de COS les plus élevés (Tableau 22).

Parmi les sols hydromorphes du littoral, qui sont caractérisés par la présence d'eau stagnante en permanence, le stock de COS à 0-1 m de profondeur des Thalassosols sous mangroves peut atteindre 363 tC/ha. Marchand et al. (2017) et Walcker et al. (2018) ont montré que l'âge de la mangrove expliquait la très grande variabilité des stocks de COS, respectivement comprise entre 4 et 107 tC/ha et entre 84 et 363 tC/ha (Figure 73). Ces stocks de COS sous mangroves peuvent être temporaires, puisque la mangrove est un système en perpétuelle évolution. Elle suit des cycles d'apparition et de disparition, dus aux phases d'extension et d'érosion de la côte guyanaise, liés au déplacement du banc de vase.

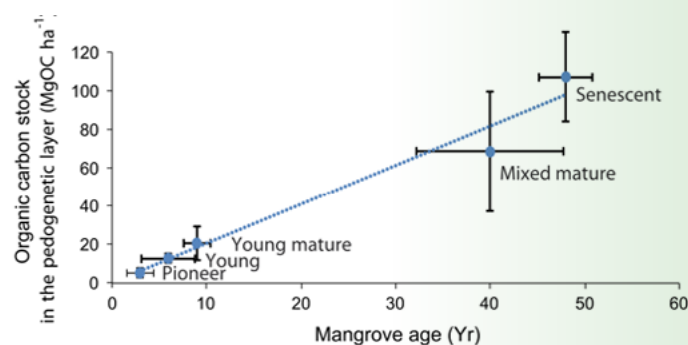


Figure 73 - Stocks de COS des mangroves du site de Kaw en fonction de leur âge [Marchand et al. (2017)]

Stocks de COS forestiers [Guitet et al.]		Stocks de COS moyen à 0-1 m [Courte 2019]	
Acrisols	81 tC/ha (+/- 12 %)	Ferralsitisols	138,6 tC/ha
Geric Ferralsol	128 tC/ha (+/- 24 %)	Réductisols	125,9 tC/ha
Haplic Ferralsol	127 tC/ha (+/- 23 %)	Podzosols	54,3 tC/ha
Autres types de sol	71 tC/ha (+/- 31 %)	Fluviosols	138 tC/ha
		Rédoxisols	138 tC/ha

Tableau 21 - Stocks de COS (tC/ha) moyens des différents types de sol à 0-1 m de profondeur [Guitet et al., non publié] et stocks de COS moyens dans l'horizon 0-1 m pour les différents types de sol du littoral. (bases de données CarsGuy, RMQS et Valsol) [Courte (2019)]. NB : Les incertitudes ne sont pas données dans l'étude.

Spatialisation des stocks de carbone du sol

Après avoir extrapolé les mesures de stocks de COS de 33 sites, à partir de la carte de répartition des types de sol, Guitet et al. (2015) ont produit une carte de répartition des stocks de COS forestier (Figure 74).

Enfin, Courte (2019) a produit 6 cartes de répartition du COS à l'échelle du littoral en fonction des types de sols et des paysages pédo-morphologiques sur trois profondeurs : 0-30 cm ; 0-50 cm ; 0-100 cm. Une de ces 6 cartes est présentée dans cette synthèse (Figure 75).

Stock global de carbone du sol et incertitudes

Les travaux de Guitet et al. (2015) permettent d'estimer le stock global de COS forestier sur l'ensemble du territoire de la Guyane à 814 millions de tC.

Courte (2019) a proposé deux méthodes pour calculer le stock de COS sur l'ensemble de la Guyane. Avec la première méthode, la valeur médiane des stocks de carbone à l'hectare a été multipliée par la superficie totale du territoire. Avec la deuxième méthode, 75 % de la superficie du territoire a été attribuée aux Ferrallitisols, 5 % aux Podzosols, 10 % aux Réductisols et Rédoxisols et 10 % aux Fluviosols^{II}. Ces deux méthodes ont conduit à des stocks de COS à 0-1 m de profondeur estimés respectivement à 612 [intervalle de confiance : 390 ; 916] et 891 [intervalle de confiance : 707 ; 1232] millions de tC. Ces résultats mettent en évidence que la Guyane représente de 13 à 19 % des stocks de carbone du sol de métropole.

II Proportions obtenues selon avis d'experts.

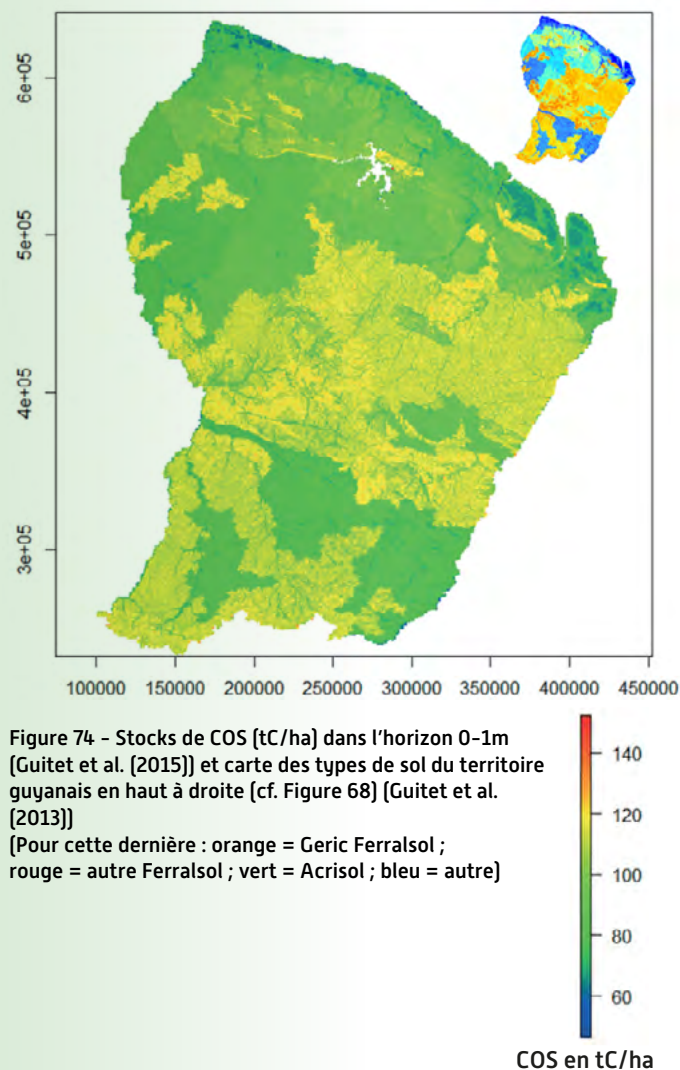


Figure 74 - Stocks de COS [tC/ha] dans l'horizon 0-1m [Guitet et al. (2015)] et carte des types de sol du territoire guyanais en haut à droite [cf. Figure 68] [Guitet et al. (2013)]

(Pour cette dernière : orange = Geric Ferralsol ; rouge = autre Ferralsol ; vert = Acrisol ; bleu = autre)

COS en tC/ha

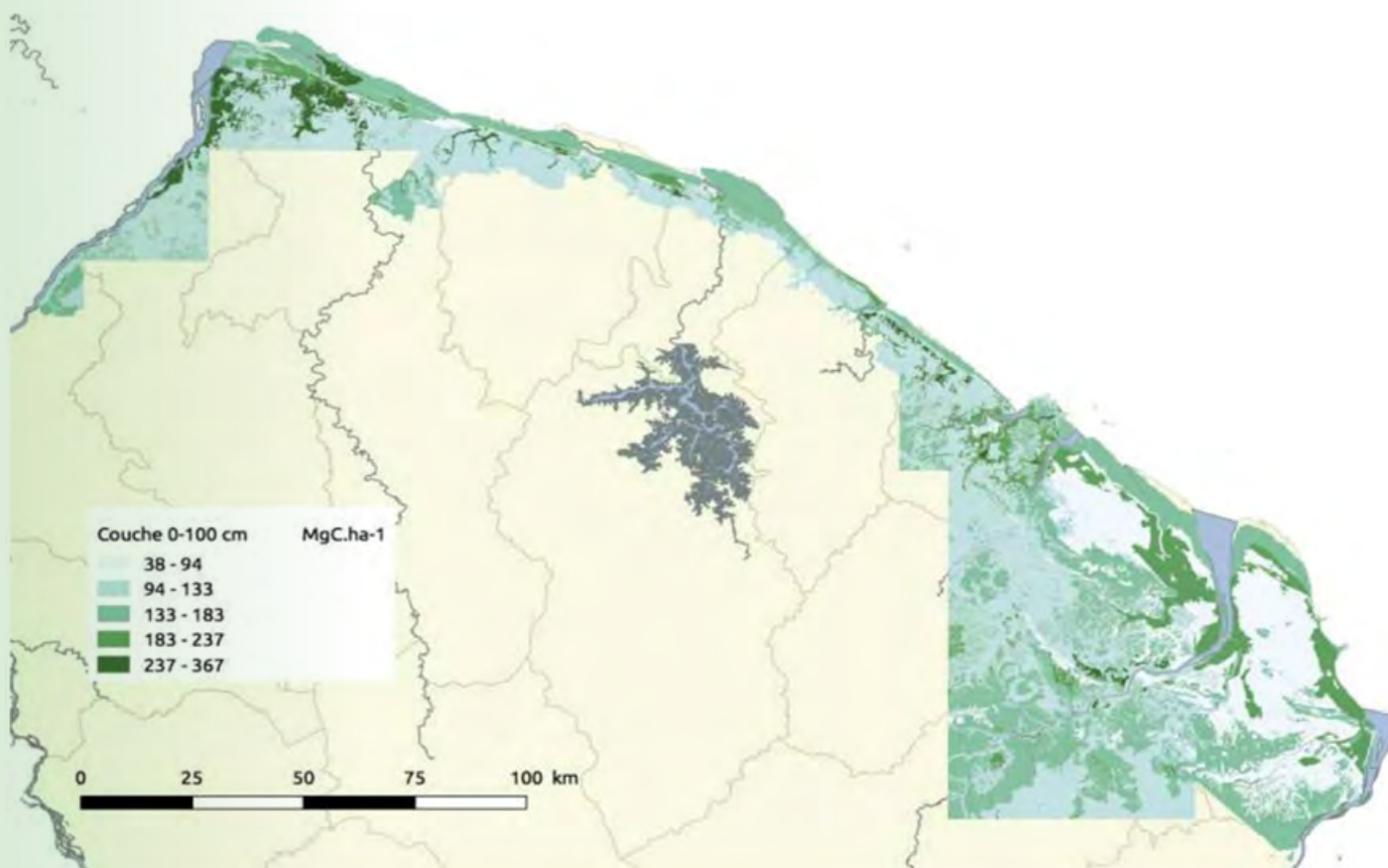


Figure 75 - Stocks de carbone de l'horizon 0-100 cm des unités pédologiques du littoral guyanais [Courte (2019)]

Par ailleurs, il convient de souligner l'incertitude associée à ce type de référence. Une des sources importantes d'incertitudes consiste en l'estimation des densités apparentes par les fonctions de pédotransfert (en l'absence de mesure). De plus, lors de l'extrapolation à l'échelle de la Guyane, l'utilisation de valeurs médianes ou moyennes par type de sols ne permet pas d'estimer l'incertitude liée à la variabilité d'un type de sol donné. L'autre source d'incertitude est liée au faible nombre d'échantillons réalisés (imposés par les contraintes et les coûts d'investigation) au regard de la forte variabilité spatiale des sols guyanais. Pour autant, malgré un échantillon relativement faible ($n=236$ points de prélèvement), l'étude de Courte (2019) a occasionné à ce jour la plus forte densité de sites mesurés en climat tropical humide.

Variabilité temporelle des stocks de carbone du sol

Les seules mesures concernant l'évolution du COS de Guyane dans le temps sont celles qui ont été réalisées dans le cadre des projets CARPAGG (Blanfort et al. (2013) ; Blanfort et al. (2012) ; Stahl et al. (2016, 2017)) et CarsGuy (Fujisaki et al. (2017) ; Courte (2019)). Elles avaient pour vocation première de permettre d'étudier l'évolution de COS lors d'une transition forêt/agriculture. L'étude CARPAGG reposait sur un dispositif synchrone et l'étude CarsGuy intégrait un pas de temps court (5 ans). Les résultats de l'étude CARPAGG pourraient être confortés par la mise en place d'une étude diachronique à partir d'un t_0 réalisé en 2010. Cette approche diachronique a été initiée en 2004 par une étude sur l'évolution du COS sous forêt non perturbée sur le site de Paracou et sur le massif de Counami. Des mesures de teneurs en COS ont été réalisées sur une dizaine de profils en 2004 puis en 2010. Une troisième cam-

pagne de mesures permettra de finaliser les résultats. Il n'existe pas de données ni de rapports publiés pour l'instant sur ces données préliminaires.

Autres déterminants des stocks de carbone du sol

Teneur en argile

En Guyane, à partir du dispositif Guyafor (12 sites forestiers), Soong et al. (2020) mettent en évidence une corrélation positive entre teneur et stock de carbone des sols à 0-30 cm de profondeur, et teneur en argile. Teneur et stock varient respectivement de 0,4 à 3 % et de 30 à 118 tC/ha pour des teneurs en argile de 0 à 67 % (Figure 76).

À une échelle locale, la variabilité du COS en fonction de la topographie s'expliquerait par la variabilité de la teneur en argile. Par exemple, sur le dispositif forestier de Paracou, Epron et al. (2006) ont observé des teneurs en COS plus élevées en haut des collines que dans les bas-fonds, qui sont, respectivement, plus argileuses et plus sableux.

Biomasse aérienne

Les compartiments terrestres sont interdépendants. Notamment, la biomasse aérienne qui tombe au sol est à l'origine de l'entrée de carbone dans le compartiment sol. Ainsi, on pourrait s'attendre à ce que la taille des stocks de carbone aérien (CA) soit fortement liée à celle des stocks de COS.

En Guyane, Soong et al. (2020) n'ont pas trouvé de corrélation linéaire entre les stocks de CA mesurés sur les 10 sites du dispositif Guyafor et leurs stocks de COS mesurés à 0-30 cm de profondeur (Figure 77). Ce résultat doit être validé sur un plus grand nombre de sites et en tenant compte de la teneur en argile comme covariable.

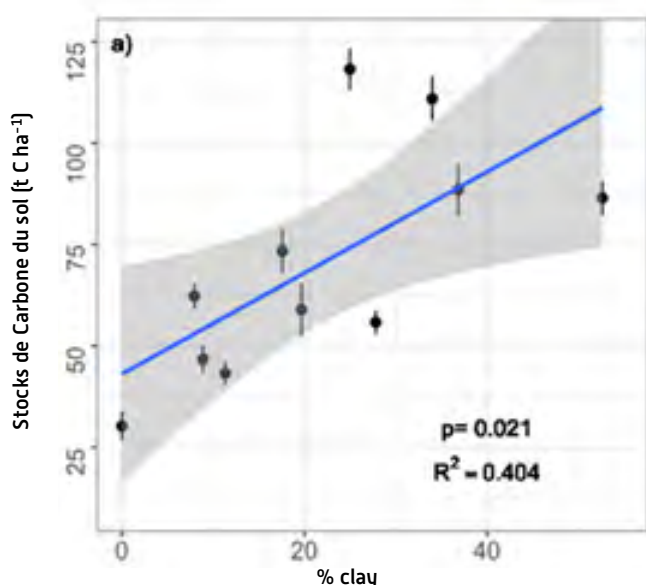


Figure 76 - Stocks de COS à 0-30 cm de profondeur en fonction de la teneur en argile [% clay] sur 12 sites forestiers du dispositif Guyafor (Soong et al. [2020])

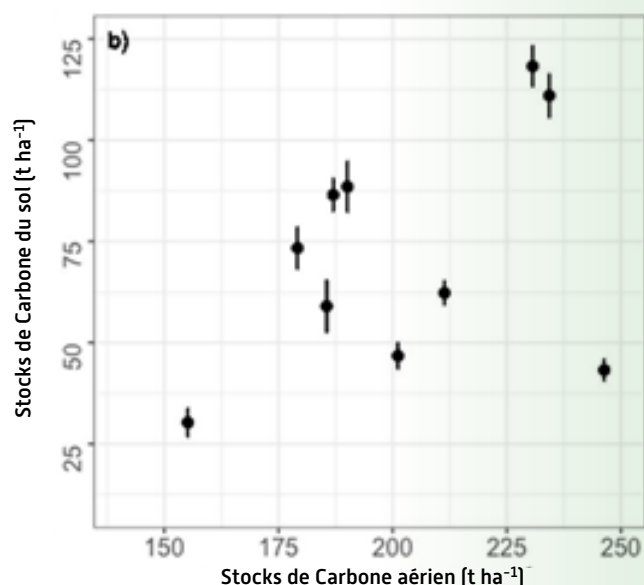


Figure 77 - Stocks de COS en fonction du stock de carbone aérien (CA) sur 10 sites du dispositif Guyafor (Soong et al., [2020]). Les valeurs indiquées au sein de la figure correspondent à la teneur en argile pour chaque site. Interprétation par V. Freycon [Cirad] : malgré son fort stock de CA, le site du Bafog-B en bas à droite a un faible stock de COS car sa teneur en argile est seulement de 11%.

Occupations humaines anciennes

Au Brésil, on trouve des terres noires qui ont été formées par d'anciennes civilisations et qui sont appelées « terra preta dos Indios ». Elles sont reconnues pour leur fertilité (Glaser and Birk (2012)) et leur teneur en COS à 0-30 cm de profondeur plus élevée que celle des sols voisins. En Guyane, sur des sites anciennement occupés par les Amérindiens, comme les montagnes couronnées, on trouve des sols plus sombres que les sols voisins mais moins sombres que les *terras pretas*. Ces sols, appelés « terra mulata », ont des teneurs en COS de 20 à 90% plus élevées que celles des sols voisins (Projet Couac, com. pers. Freycon et Ferry (2023)).

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



De la forêt vers l'agriculture

La dynamique d'évolution du COS à la suite d'une défriche agricole a été étudiée en Guyane dans le cadre des projets CarsGuy (Fujisaki et al. (2017) ; Courte (2019)) et CARPAGG (Blanfort et al. (2013) ; Stahl et al. (2016) ; Stahl et al. (2017)). Dans le cadre du projet CarsGuy, trois agrosystèmes ont été implantés sur le site de Combi à la suite d'une défriche sans brûlis : une prairie fauchée, une rotation annuelle maïs/soja avec labour et une rotation annuelle maïs/soja sans labour (Fujisaki et al. (2017)). Les analyses de sol ont été faites annuellement jusqu'à 5 ans après la déforestation sur les 30 premiers centimètres. Jusqu'à un an et demi après la déforestation, le stock de COS dans les trois agrosystèmes mis en place a augmenté, grâce aux débris de bois laissés au sol permettant un enrichissement en carbone. En revanche, cinq ans après la déforestation, le stock de COS des deux systèmes de cultures annuelles avec et sans labour avait

diminué respectivement de 12 % et 14 % par rapport au COS initial de la forêt, tandis que celui de la prairie fauchée était revenu à un niveau similaire à celui de la forêt (Figure 78).

Dans le cadre du projet CARPAGG, des stocks de COS ont été mesurés le long d'une chronoséquence composée de 24 prairies âgées de 6 mois à 36 ans, et mises en place après une défriche avec brûlis. Les stocks de COS ont été comparés avec ceux de 4 sites forestiers (témoins). Les prélèvements de sol ont été faits sur une profondeur de 1 m, en distinguant 3 horizons : 0-20 cm, 20-50 cm et 50-100 cm. Les stocks de COS à 0-1 m de profondeur des prairies de moins de 20 ans étaient inférieurs à ceux des forêts (86 ± 6 vs 100 ± 7 tC/ha), tandis que ceux des prairies de plus de 25 ans étaient supérieurs à ceux des forêts (118 ± 10 vs 100 ± 7 tC/ha). Stahl et al. (2016) ont aussi montré l'importance du « carbone profond » dans ce processus de stockage du COS en prairie, pour lequel la contribution de la couche 50-100 cm varie entre 22 et 31 % du stock total de la couche 0-1 m de profondeur (Figure 79).

Au-delà de l'effet indiscutable de la déforestation sur les pertes de carbone aérien ainsi que sur les émissions de GES, les projets CarsGuy et CARPAGG ont montré la capacité des prairies à retrouver un stock de COS équivalent ou supérieur à celui des sols des forêts d'origine quelques décennies après la déforestation. Les pertes de COS au moment de la défriche et leur évolution sont très dépendantes des techniques de défriche utilisées et des pratiques de culture mises en place par la suite.



De la forêt vers les milieux aquatiques : cas du barrage de Petit-Saut

La mise en eau en 1994 du barrage hydroélectrique de Petit-Saut a engendré l'immersion d'environ 300 km² de forêts et de 10 millions de tonnes de carbone (Galy-Lacaux et al. (1997)), dont 42 % contenus dans le sol. Aujourd'hui, on considère que la moitié du COS du réservoir, notamment le carbone facilement dégradable comme la biomasse microbienne, a été perdue dans l'atmosphère sous forme de CO₂ et de CH₄.

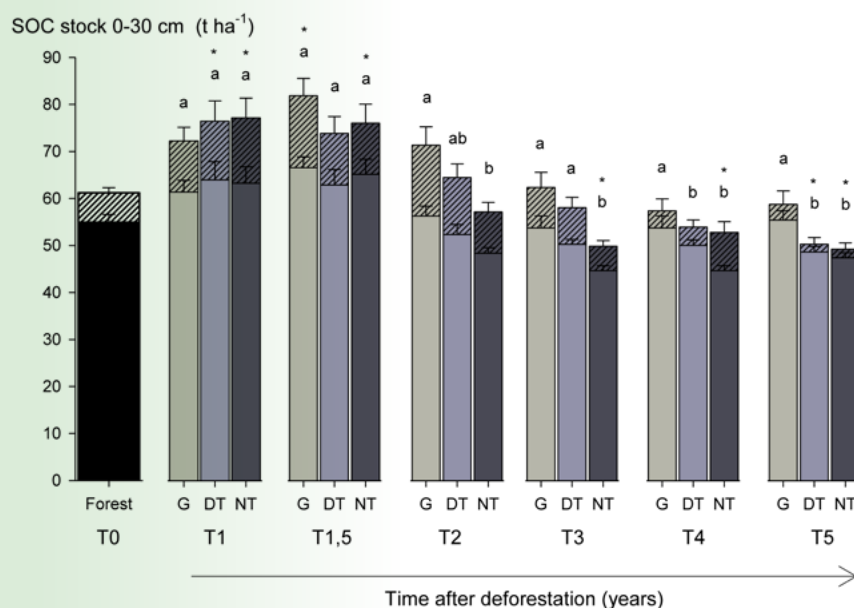


Figure 78 - Evolution des stocks de COS de 0 à 5 ans après défriche à 0-30 cm de profondeur. [Fujisaki et al. (2017)]. G = prairie fauchée ; DT = maïs/soja avec labour ; NT = maïs/soja sans labour

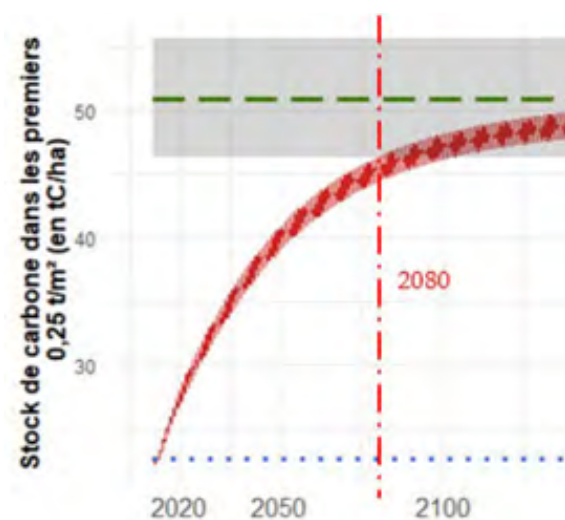
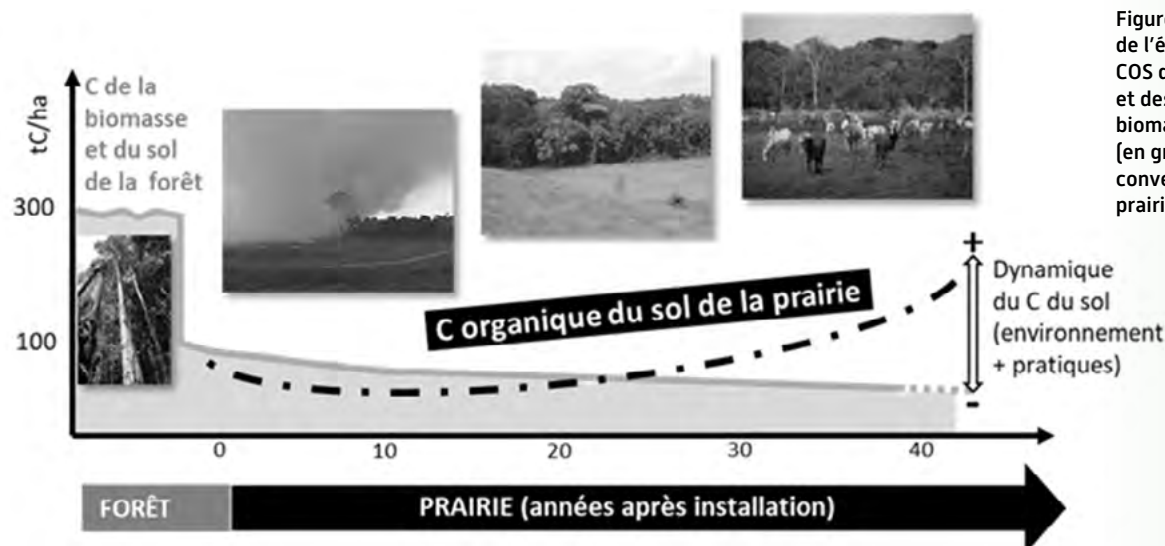


Figure 82 - Evolution du stock de COS à 0-50 cm de profondeur en fonction du temps dans une parcelle revégétalisée, modélisé par le modèle RothC. [Le Chanoine du Manoir de Juaye (2021)]



Des occupations humaines vers la forêt : cas de la revégétalisation de sites miniers

Les exploitants miniers doivent réhabiliter les sites miniers après exploitation. Trois auteurs ont suivi d'anciens sites miniers guyanais : Schimann et al. (2012), Couic et al. (2018) et Le Chanoine du Manoir de Juaye (2021) dans le cadre du projet Carbiosol. Ces suivis ont porté sur l'évaluation de la qualité de restauration écologique des sites, notamment leur réhabilitation^{III} et revégétalisation^{IV} (Figure 80).

Les auteurs ont mesuré des indicateurs microbiens (dont les résultats ne sont pas présentés dans cette étude) et des stocks de

COS sur des sites miniers et la forêt environnante. Sur le site de la société minière SMSE de Saint-Elie, les stocks de COS à 0-1 m de profondeur de sites réhabilités ou revégétalisés depuis 10 ans, étaient respectivement 50 % à 25 % plus faibles que ceux de la forêt environnante (Figure 81).

D'autre part, en simulant l'évolution du COS (modèle RothC) dans les 50 premiers cm du sol d'un site revégétalisé en 2012, Le Chanoine du Manoir de Juaye (2021) a montré que les stocks de COS atteindraient ceux de la forêt d'ici 2080, soit au bout de près de 70 ans (Figure 82).

III Fermeture des mines et nivellement du terrain afin de faciliter la régénération naturelle.

III Ajoute aux opérations de régénération une action de revégétalisation.

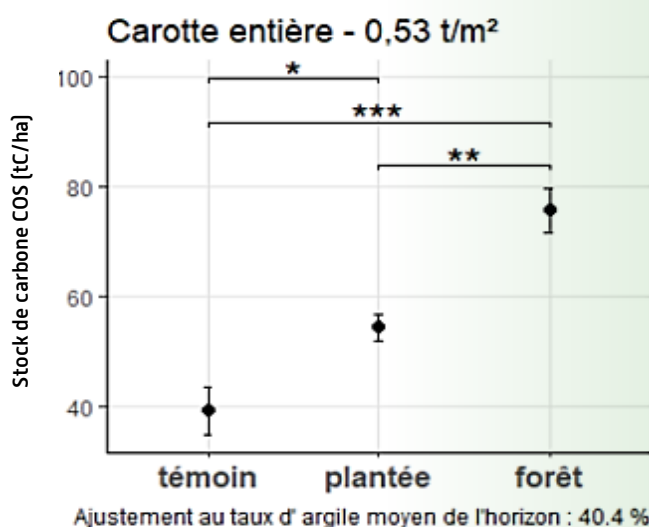
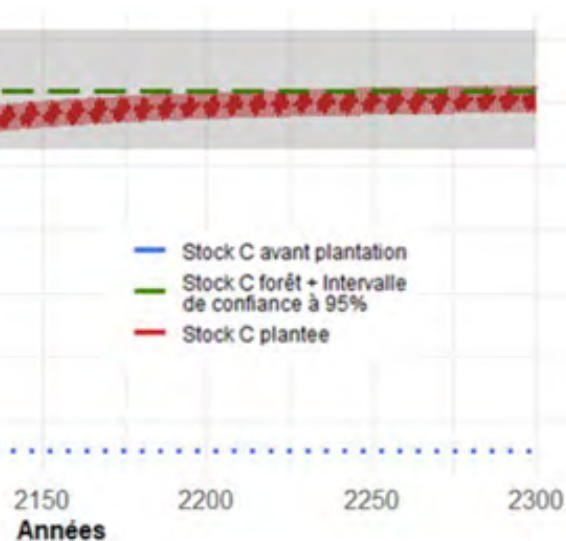


Figure 81 - Stocks de COS sous site réhabilité depuis 10 ans (« témoin »), revégétalisé depuis 10 ans (« plantée ») et forestier à 0-1 m de profondeur. [Le Chanoine du Manoir de Juaye (2021)] * p < 0,05 ; ** p < 0,01 ; *** p < 0,001 pour le test post-hoc de Tuckey.



EFFETS DES PRATIQUES D'EXPLOITATION FORESTIÈRE : CAS DE LA PRODUCTION DE BOIS À DES FINS ÉNERGÉTIQUES

En 2015, l'ONF a mené une étude en collaboration avec INRAE, l'Unité Mixte de Recherche EcoFoG et le bureau d'études Solicaz afin d'évaluer l'impact de l'exploitation forestière pour la production de bois à des fins énergétiques sur les services écosystémiques fournis par les sols de la forêt (INRAE (2015)). Les auteurs ont testé l'effet d'une coupe rase sur le site de Saint-Elie et d'une exploitation dirigée^V ou non dirigée^{VI} sur le site de Risquetout. La teneur en Carbone Organique Dissous (COD) ou en COS à 0-10 cm de profondeur a été mesurée 40 ans après la coupe rase à Saint-Elie et 4 ans après l'exploitation à Risquetout. A Saint-Elie, 40 ans après sa coupe rase, la teneur en COD de la parcelle était beaucoup plus importante que celle de la forêt témoin (Figure 83). Les auteurs concluent que la coupe rase permet un apport en matière organique issus des racines mortes et de la litière (les feuilles mortes, les petites branches, etc.) à l'origine de cette augmentation. Ils observent en revanche une modification des capacités de nitrification du sol, fonction impliquée dans la minéralisation de l'azote. Ainsi, même si la coupe rase permet une augmentation de la teneur en COD, elle pourrait être à l'origine d'une perturbation de la capacité de l'écosystème à

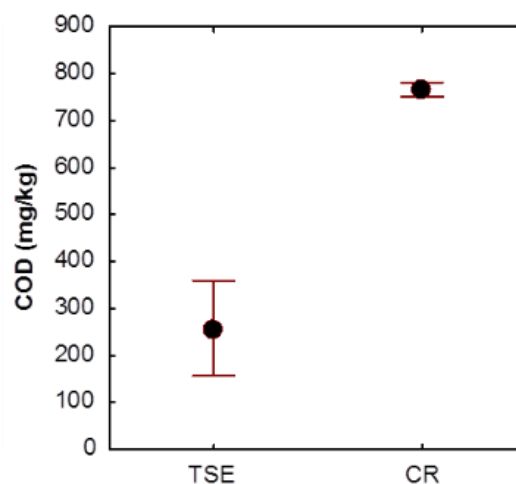


Figure 83 - Teneur en Carbone Organique Dissous (COD) à 0-10 cm sur le site de Saint-Elie (INRAE 2015)

TSE : Témoin Saint-Elie (forêt non exploitée) ; CR : Coupe Rase

fournir des nutriments azotés à la végétation et ainsi de la fixation du CO₂ par photosynthèse.

A Risquetout, 4 ans après l'exploitation, la teneur en COS de la parcelle avec une exploitation dirigée était plus faible de 15 % que celle de la parcelle avec une exploitation non dirigée et de la parcelle témoin (INRAE (2015)). Ce résultat est principalement expliqué par des phénomènes de lessivage impactant en cascade la biomasse microbienne du sol (perte de 20 %) et donc les capacités de minéralisation et de séquestration carbone (INRAE 2015). Ces résultats devront être validés, à la fois concernant les stocks de COS et sur le long terme, en tenant compte du tassement du sol qui a eu lieu lors de l'exploitation non dirigée.

^V Exploitation suivant les consignes définies et après une préparation fine du chantier visant à assister au maximum l'exploitant (désignation et implication de l'ONF dans l'implantation des pistes)

^{VI} Exploitation selon les mêmes consignes que pour l'exploitation dirigée, mais sans marquage ni assistance sur le terrain (pas d'implication de l'ONF)

Prélèvement de sol en forêt par carottage [crédit photo : V. Blanfort]





EFFET DES PRATIQUES LIÉES À LA DÉFRICHE AGRICOLE

La défriche traditionnelle vs mécanisée

En Guyane, on distingue la défriche traditionnelle et la défriche mécanisée. La défriche traditionnelle est réalisée à la main avec une tronçonneuse pour abattre les gros arbres, puis les plus petits bois sont débités à la machette. La parcelle est ensuite brûlée (« abattis brûlis »). Dans la défriche mécanisée, la majeure partie de la biomasse aérienne forestière est abattue, mise au sol et réunie en andains à l'aide de pelles ou de bulldozers. Les andains sont ensuite brûlés. Actuellement, la grande majorité des défriches sont mécanisées. La défriche mécanisée entraîne une plus grande perte de sol que la défriche manuelle, et donc de COS, à cause du décapage^{VII}, du tassement et de l'érosion^{VIII} causés par le passage des engins mécanisés.

La défriche avec brûlis vs sans brûlis

La défriche avec brûlis « slash-and-burn »^{IX} (« couper et brûler ») est une technique ancestrale utilisée en agriculture pour enrichir les sols en minéraux fertilisants. Ses bénéfices agronomiques sont aujourd'hui remis en question : pertes de micro et macrofaune

(Rossi et al. (2010)), formation d'un sol nu sensible à l'érosion, perte d'azote par volatilisation, etc.

Il existe en Guyane un intérêt croissant pour les méthodes de défriche sans brûlis « chop-and-mulch » (« hacher et pailler »), afin de concilier le développement agricole et le développement d'une filière biomasse-énergie (Aubertin and Cialdella (2016)). En outre, la déforestation sans brûlis produit des débris de bois qui se décomposent dans le sol et peuvent s'avérer intéressants dans le maintien des stocks de COS après déforestation. En suivant la quantité et de la qualité des débris de bois apportés au sol lors de la défriche sans brûlis, Fujisaki et al. (2017) ont montré que l'apport massif de cette biomasse ligneuse était à l'origine d'une augmentation temporaire des stocks de COS disparaissant 5 années après la défriche.

Courte (2019) a simulé avec le modèle RothC l'évolution des stocks de COS sous forêt à partir des données issues des bases de données CarsGuy et RMQS selon deux scénarios de défriche, avec et sans brûlis^X. 35 ans après la défriche, les pertes de COS à 0-30 cm de profondeur entre les 2 scénarios n'étaient pas significativement différentes (22,7 vs 24,4 tC/ha).

VII Arrachage des horizons supérieurs lors des manœuvres des engins ou par raclement du sol lors de la mise en andains des troncs. Cette couche de sol est généralement la plus concentrée en matière organique.

VIII Le tassement réduit la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol, favorise le ruissellement et l'érosion.

IX Identique à la défriche traditionnelle mentionnée précédemment.

X Les 2 scénarios comprenaient également un broyage du sous-bois, l'implantation d'une plante de couverture ainsi qu'un système de cultures annuelles avec restitution des résidus de culture au sol.



EFFET DES PRATIQUES LIÉES À LA DÉFRICHE AGRICOLE

Effet des pratiques agricoles

L'agriculture à faible impact

Dans le cadre du projet CarsGuy, les pratiques agricoles favorables au stockage de carbone dans les sols ont été étudiées (Courte et al. (2020) ; Courte (2019)). Des analyses de sol ont été réalisées jusqu'à 30 cm de profondeur sur des parcelles agricoles âgées de 2 et 30 ans, le long du littoral guyanais. Les parcelles étudiées ont été classées en trois groupes selon les pratiques utilisées : systèmes « à faible impact », « à forts intrants » et « traditionnels » (Tableau 22).

La Figure 84 nous montre que les stocks de COS dans les systèmes à faible impact ont évolué suivant deux trajectoires : (flèche b) une lente augmentation après une faible perte de 10 tC/ha 3 ans après la défriche, et (flèche a) une forte augmentation après un gain allant jusqu'à 30 tC/ha 2 ans après la défriche (Groupe

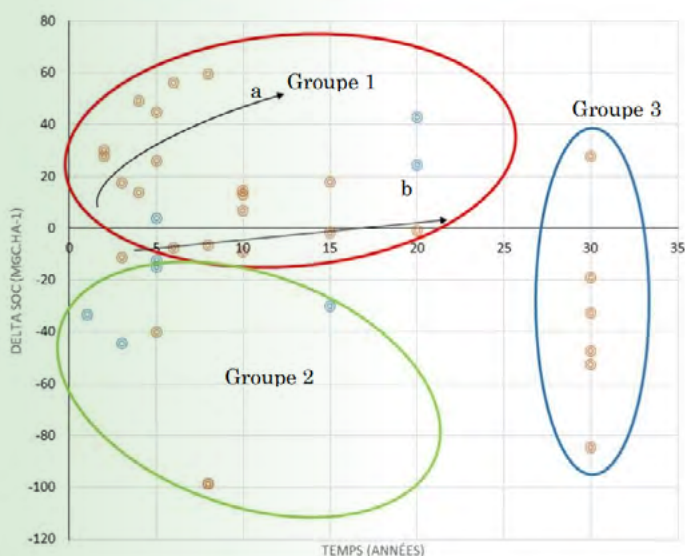


Figure 84 - Différence entre stocks de COS forestiers et agricoles en fonction de l'âge de la parcelle. [Courte (2019)]. Les parcelles ont été classées en trois groupes : Groupe 1 = Systèmes à faible impact ; Groupe 2 = Systèmes à forts intrants ; Groupe 3 = Systèmes traditionnels.

1). Les stocks de COS dans les systèmes à forts intrants ont, quant à eux, diminué de 20 à 60% 2 à 6 ans après la défriche (Groupe 2). Les stocks de COS des systèmes traditionnels, enfin, étaient variables (baisse de 30 % à augmentation de 13 % par rapport aux stocks initiaux) 30 ans après la défriche (Groupe 3). Cette étude montre l'intérêt d'utiliser des systèmes à faible impact pour augmenter le COS. Par contre, elle ne permet pas de conclure sur l'effet individuel des différentes pratiques.

L'ajout de litière

L'ajout de matière organique dans le sol est l'une des pratiques « phares » de l'agriculture à faible impact. Il est souvent considéré que cet apport de matière organique, décomposée par les micro-organismes du sol, permet un enrichissement en carbone dans le sol. Or les résultats du projet CarsGuy ont montré que la défriche sans brûlis ne contribuait pas à un enrichissement en COS à long terme (Fujisaki et al. (2017)). L'effet de l'apport de litière aérienne sur le sol a aussi été étudié sur le site forestier de Paracou. Soong et al. (2018) ^{XI} ont ainsi montré que cet apport de litière multipliait par deux le carbone microbien du sol (constitutif du COS), mais aussi par 10 la respiration microbienne. Cette stimulation de l'activité microbienne, appelé « priming effect », conduit généralement à une augmentation du COS seulement sur le court terme.

Le BRF

Le Bois Raméal Fragmenté (BRF) est un amendement organique utilisé en Guyane et composé de copeaux de bois obtenus par broyage de rameaux. Dans les pratiques de défriche sans brûlis, les rameaux de bois peuvent en effet être valorisés en BRF. Courte (2019) a modélisé (Figure 85) l'évolution temporelle des stocks

^{XI} Expérience réalisée en laboratoire en Belgique avec du sol et de la litière de Paracou.

	Systèmes à faible impact [20 parcelles]	Systèmes à forts intrants [5 parcelles]	Systèmes traditionnels [6 parcelles]
Usages et pratiques utilisées	- Polyculture élevage - Maraîchage et arboriculture - Exploitations en agriculture biologique - Travail du sol manuel - Peu d'intrants de synthèse - Techniques agroécologiques (BRF – Bois Raméaux Fragmentés – issus de la défriche, amendements organiques, rotations, couvert végétal)	- Maraîchage et arboriculture monospécifiques - Exploitations mécanisées - Recours systématique aux intrants chimiques et organiques	- Implantés de façon informelle - Abattis-brûlis en itinérance - Agriculture vivrière traditionnelle - Abandon progressif des parcelles

Tableau 22 - Résumé des caractéristiques de la typologie des exploitations testées dans Courte (2019) et Courte et al. (2020)



Récupération de troncs après déforestation (crédit photo : V. Blanfort)

de COS dans un système à forts intrants après une défriche sans brûlis et utilisation d'un BRF (en bleu), et dans un système à faible impact avec un apport de BRF ou de paillis tous les 2 ans (en orange). En vert est indiquée l'évolution du SOC sous prairie qui décroît après défriche et se reconstitue progressivement jusqu'à se rapprocher de son niveau initial.

L'apport de BRF a entraîné une augmentation rapide du COS avant que celui-ci ne chute dès un an après l'apport. Le BRF peut

donc être intéressant pour augmenter les stocks de COS, sous réserve d'un apport régulier.

Le travail du sol

Comme vu précédemment, Fujisaki et al. (2017) ont montré qu'en Guyane, après 4 années de culture maïs/soja, les stocks de COS à 0-30 cm de profondeur n'étaient pas significativement différents entre les parcelles avec labour et les parcelles sans labour (Figure 78).

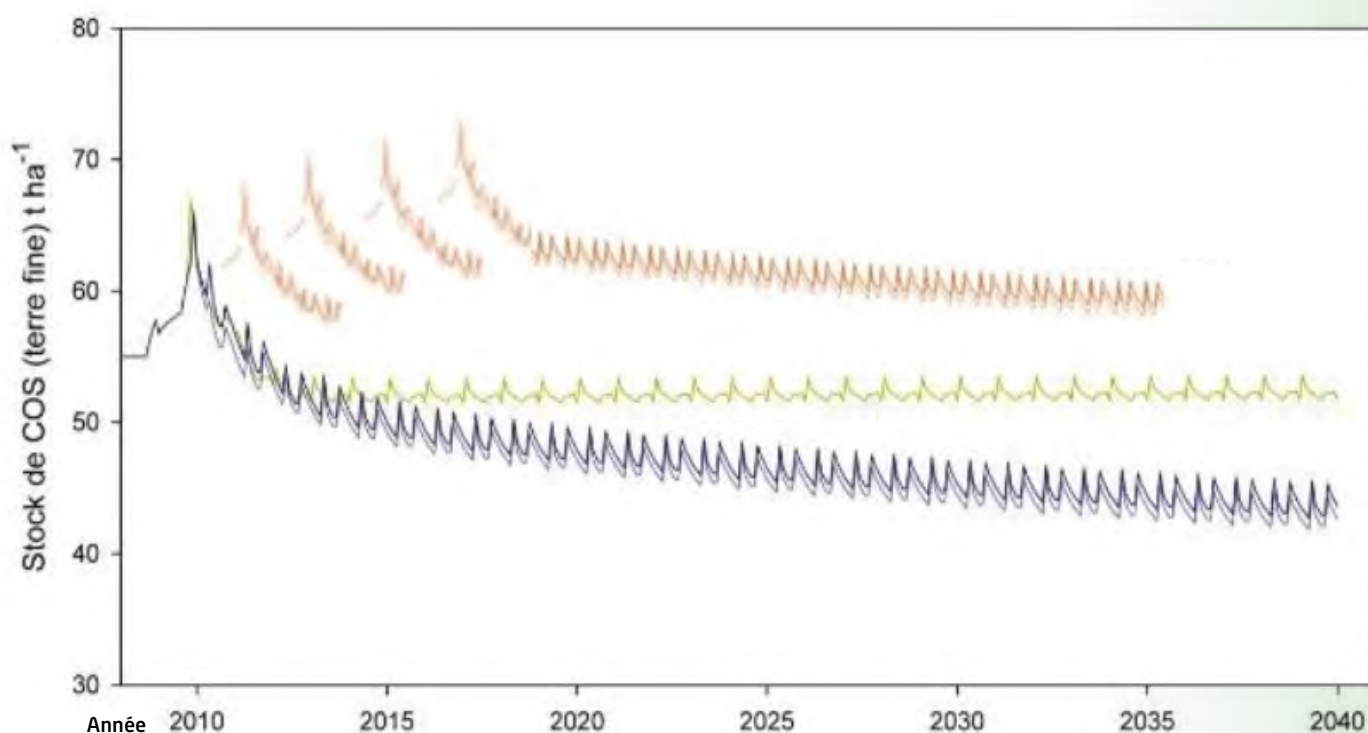


Figure 85 - Modélisation des évolutions du COS dans le temps pour 2 systèmes après apport de Bois Raméal Fragmenté et sous prairie après défriche. Courbe bleue : système à forts intrants après une défriche sans brûlis et utilisation d'un BRF ; Courbe orange : système à faible impact avec un apport de BRF ou de paillis tous les 2 ans ; Courbe verte : prairie après défriche [Courte (2019)]

Stocks de carbone dans la biomasse aérienne et principaux déterminants

Avec 95 % de sa surface recouverte de forêt et une démographie croissante entraînant une augmentation des besoins en bois et en surfaces non forestières pour le développement, la Guyane présente de forts enjeux liés au carbone contenu dans la biomasse forestière.

Le stock de carbone forestier en Guyane se répartit en moyenne de la façon suivante : 30 % dans le sol, 52 % dans la biomasse vivante aérienne, 13 % dans la biomasse vivante souterraine (racines), 4 % dans le bois mort et 1 % dans la litière (FAO (2020)). Outre le compartiment sol, la biomasse vivante aérienne est le compartiment le plus étudié pour décrire le carbone stocké dans les forêts.

Après avoir présenté une estimation des stocks de carbone aérien (CA), c'est-à-dire le stock de la biomasse vivante aérienne, sur le territoire, cette section fait état des connaissances sur les principaux déterminants de sa variabilité (spatiale et temporelle). Elle expose ensuite l'effet des changements globaux (climat, usage des sols) ainsi que des pratiques de gestion forestière.

Les études recensées montrent que le territoire, recouvert par 8,1 millions d'hectares de forêt, compte environ 1,32 milliards de tonnes de carbone contenues dans la biomasse aérienne. La variabilité spatiale est importante, avec des stocks allant de 75 à 250 tC/ha en fonction de la géomorphologie. Les forêts des montagnes et des plateaux au centre concentrent plus de carbone à l'hectare que celles des plaines côtières et des dépressions au nord et au sud.

L'extension de l'agriculture est la première cause de changement d'usage des sols en Guyane. A l'échelle de la parcelle, elle entraîne la perte de la quasi-totalité du carbone aérien forestier. Un fort enjeu existe sur la valorisation de cette biomasse aérienne, en bois d'œuvre ou en production d'énergie par exemple, cette dernière voie ayant fait l'objet de plusieurs études de bilan carbone et GES en Guyane. Ainsi, valoriser la biomasse aérienne des défriches agricoles en production d'énergie permet d'en réduire de 30 % le bilan GES et carbone.

L'exploitation forestière est à l'origine d'importantes pertes de CA au moment de l'exploitation, qui mettent plusieurs décennies à se reconstituer. Ces pertes sont dues à l'exploitation en elle-même et aux dégâts indirectement causés par l'activité. Elle nécessite ainsi la mise en place de stratégies permettant de réduire cet impact. Entre autres, l'utilisation de techniques d'exploitation à faible impact peut réduire de 50 % les dommages sur les stocks de carbone aérien de la forêt. Aussi, l'exploitation intensive, dans le cadre de règles de gestion durable, sur de faibles surfaces est une meilleure stratégie pour réduire le bilan carbone par rapport à une exploitation modérée sur de grandes surfaces.

Finalement, l'exploitation actuellement pratiquée en Guyane, complétée de plantations d'arbres, ainsi qu'une valorisation des déchets dans l'énergie, serait le meilleur scénario permettant en Guyane d'assurer une production de bois durable sur les plans de l'approvisionnement et de l'impact sur les stocks de CA.

Comment évaluer les stocks de carbone aérien à l'échelle du territoire ?

L'évaluation du stock de carbone aérien (CA) passe par l'évaluation des stocks de biomasse vivante aérienne. Selon le GIEC, la biomasse vivante aérienne est définie comme étant « la biomasse de la végétation vivante, ligneuse et herbacée, au-dessus du sol, y compris les tiges, les souches, les branches, l'écorce, les graines et le feuillage ». Par convention, on considère que le carbone représente 50 % de la biomasse contenue dans l'arbre, exprimée en tonnes de matière sèche (Equation 2).



Équation 2
Calcul de la quantité de carbone en fonction de la biomasse aérienne (GIEC 2006)

Stocks CA (tC/ha) = teneur en C x stocks biomasse aérienne (tMS/ha)

La biomasse d'un arbre s'exprime en tonnes de masse sèche (tMS). Dans la majorité des inventaires forestiers, la biomasse des arbres de diamètre inférieur à 10 cm n'est pas prise en compte. La « biomasse vivante aérienne » telle qu'elle est calculée correspond donc à la masse aérienne vivante des végétaux ligneux d'un diamètre supérieur à 10 cm. Cette approche a plus ou moins de

conséquences sur les estimations de biomasse selon les faciès forestiers : pour les peuplements dominés par les grands arbres, il existe peu de biais alors que pour des peuplements dominés par des arbres de faible diamètre, des lianes ou des palmiers, le biais est susceptible d'être important.

Pour évaluer la biomasse d'un grand nombre d'arbres on utilise des « équations allométriques » qui sont des modèles statistiques permettant d'estimer la biomasse d'un arbre en passant par des données mesurables de façon non destructive comme le diamètre, la densité du bois et la hauteur. Les « équations allométriques pantropicales » de Chave et al. (2014) sont les plus répandues et utilisées (Equation 3). Il existe également des équations allométriques qui ont été spécifiquement développées en Guyane française. Elles sont décrites dans Dourdain & Hérault (2015).



Équation 3
Équations allométriques pantropicales (Chave et al. [2014])

Biomasse vivante aérienne = 0,0673 x [densité du bois x diamètre à hauteur de poitrine² x hauteur]^{0,976}

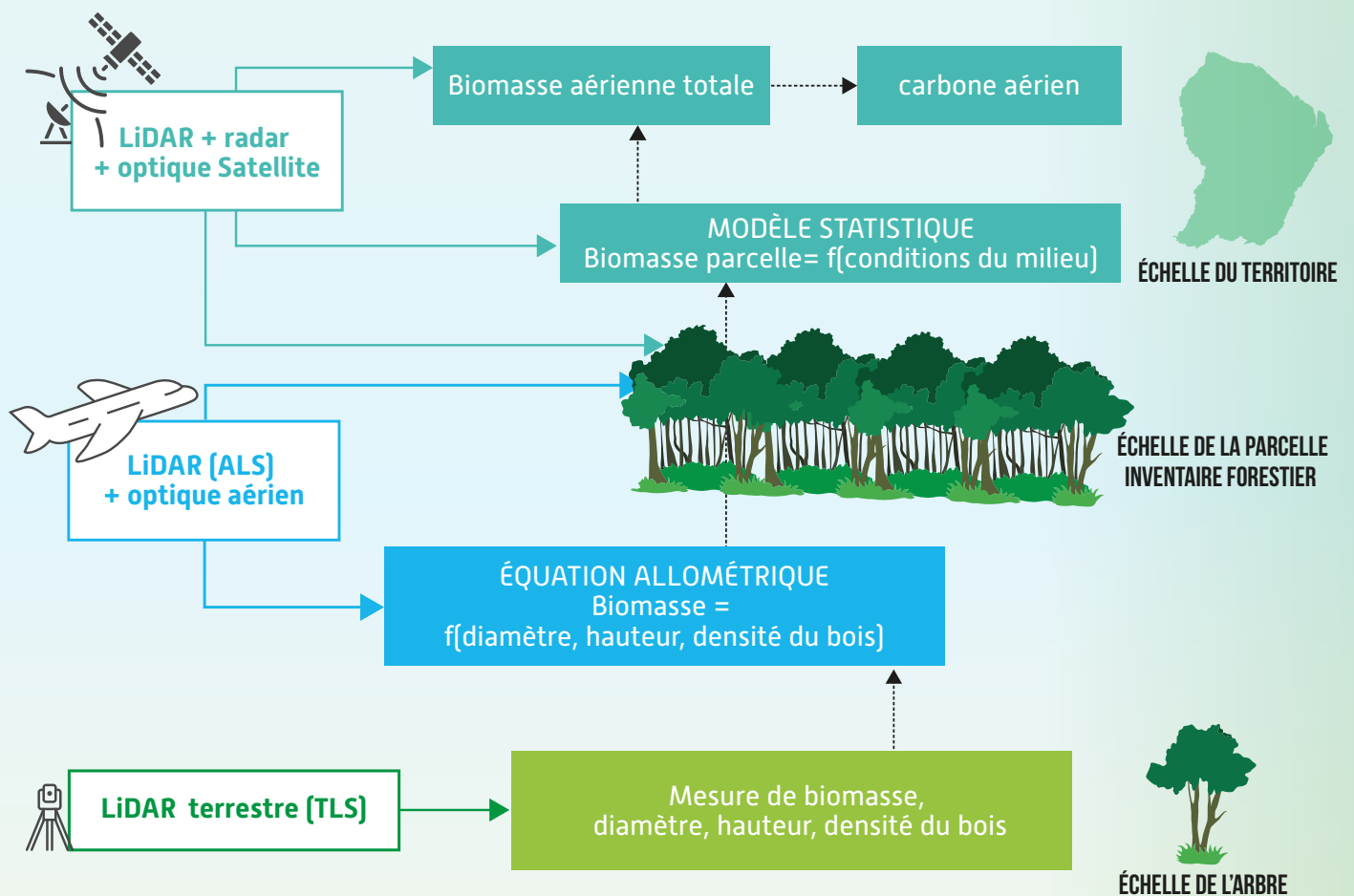


Figure 86 - Schéma récapitulatif de la méthode employée pour estimer le carbone aérien forestier à l'échelle d'un territoire. ALS : Airborne Laser Scanning ; TLS : Terrestrial Laser Scanning

Les équations allométriques utilisent des mesures généralement intégrées dans les inventaires forestiers de parcelles dans lesquelles les arbres ont été inventoriés, mesurés et identifiés botaniquement sur une surface connue. Les équations peuvent donc être appliquées à chacun des arbres pour calculer sa biomasse et la somme des biomasses estimées permet d'obtenir la biomasse de la parcelle. Pour accéder à la densité du bois d'un arbre, on se sert de la moyenne (ou médiane) de son espèce.

En Guyane, de nombreux inventaires forestiers ont été réalisés au cours des dernières décennies, permettant de suivre plus de 350 000 arbres. Les parcelles d'inventaires sont réparties sur le territoire et représentent une diversité d'habitats qui peuvent être caractérisés par des variables environnementales (topographie, hydrologie, etc.).

Les données des inventaires forestiers (biomasse aérienne et variables environnementales) permettent ainsi de calibrer des modèles qui estiment la biomasse d'une zone en fonction de ses variables environnementales (Figure 86). On peut alors accéder à des estimations de la biomasse aérienne forestière sur toutes les zones où les conditions environnementales sont décrites (dans des cartes topographiques, hydrographiques, etc.).

Depuis quelques années de nouvelles méthodes de quantification de la biomasse aérienne des forêts par télédétection ont été développées (Figure 86). La télédétection regroupe les techniques d'acquisition d'informations à distance. Elle utilise notamment

des technologies qui envoient des ondes pour détecter la présence d'un objet et sa position. Concernant la biomasse végétale, on utilise le LiDAR (« Light Detection and Ranging »). C'est un système qui utilise de la lumière (laser). Dans la même logique que les équations allométriques, pour associer un signal LiDAR à une valeur de biomasse, il faut que des modèles aient été calibrés et validés en utilisant des données acquises sur le terrain (Chave *et al.* 2019).



Tour à flux sur le dispositif CARPAGG (crédit photo : R. Pocard)

Evaluation des stocks de carbone aérien sur l'ensemble du territoire

Trois travaux font figure de références en Guyane en termes d'estimation de la biomasse aérienne forestière : ceux de Molto (2012, biomasse fraîche), de Guitet et al. (2015ab) et de Fayad et al. (2016).

L'estimation de Fayad (2016) repose sur une évaluation de la hauteur des arbres grâce à un LiDAR satellitaire. Toutes ces estimations reposent sur la méthode précédemment expliquée, avec des variations dans les variables utilisées et les modèles calibrés (Figure 87).

Le stock de CA est estimé aux alentours de 1,3 milliards de tonnes de carbone sur l'ensemble du territoire, mangroves comprises (1,28 GtC selon Guitet et al. (2015) et 1,32 GtC selon Fayad (2016)).

En ce qui concerne les mangroves, Proisy et al. (2007) ont proposé une cartographie des stocks de biomasse aérienne, évaluée

par télédétection (Figure 88). Celle-ci présente une structure avec un gradient d'âge (et donc de taille des arbres et de biomasse) de la côte vers l'intérieur des terres, où l'on retrouve les mangroves les plus âgées, avec des stocks de 0 à 50 tC/ha pour les stades les plus juvéniles et de 200 à 250 tC/ha pour les mangroves les plus âgées.

A l'échelle du territoire guyanais, Walcker (2015) a évalué le stock de carbone des mangroves à 0,008 Gt, soit 0,5 % du CA forestier de Guyane.

Cependant, les stocks de CA forestier ne se répartissent pas uniformément sur le territoire car il existe une forte variabilité spatiale de la biomasse des forêts guyanaises, comprise entre 150 et 500 tMS/ha (Figure 89).

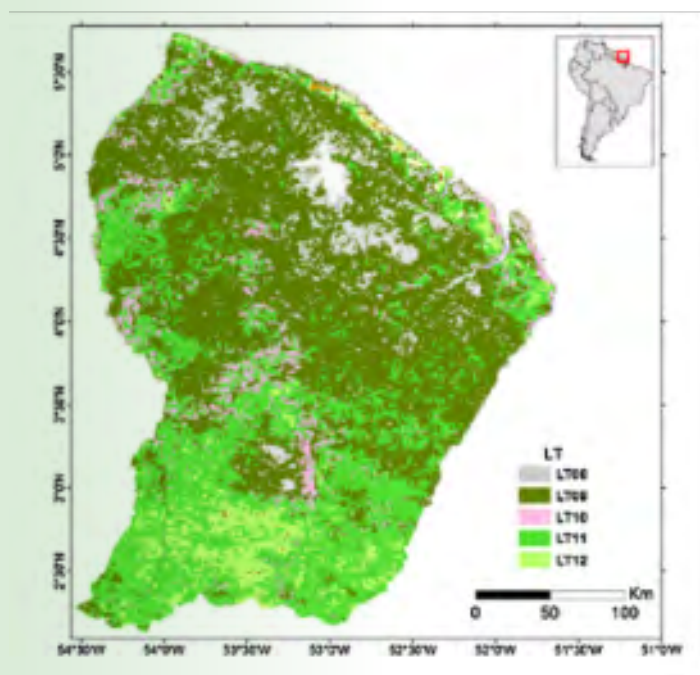
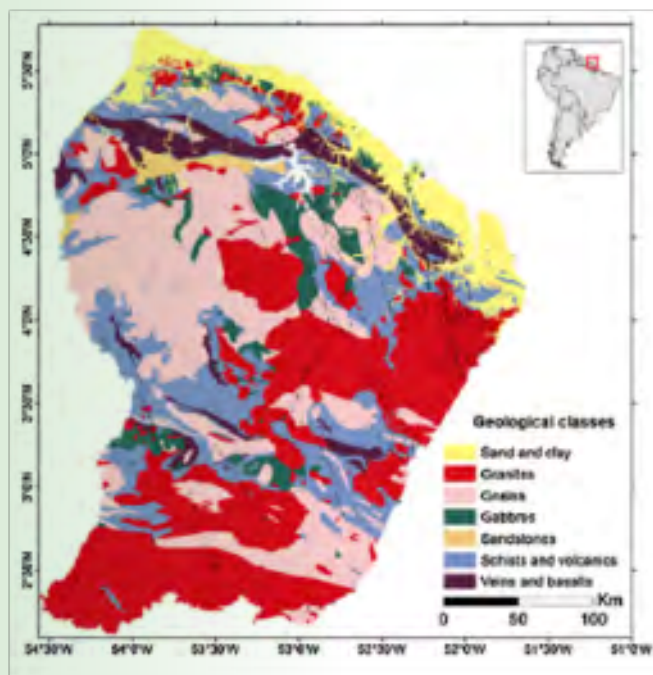


Figure 87 - Variables de milieux dérivées de données cartographiques et/ou de télédétection : géologie, végétation, topographie, hydrographie, climat, géomorphologie, structure du peuplement.



Vue de la forêt à Paracou depuis la tour à flux Guyaflux (crédit photo : V. Blanfort)

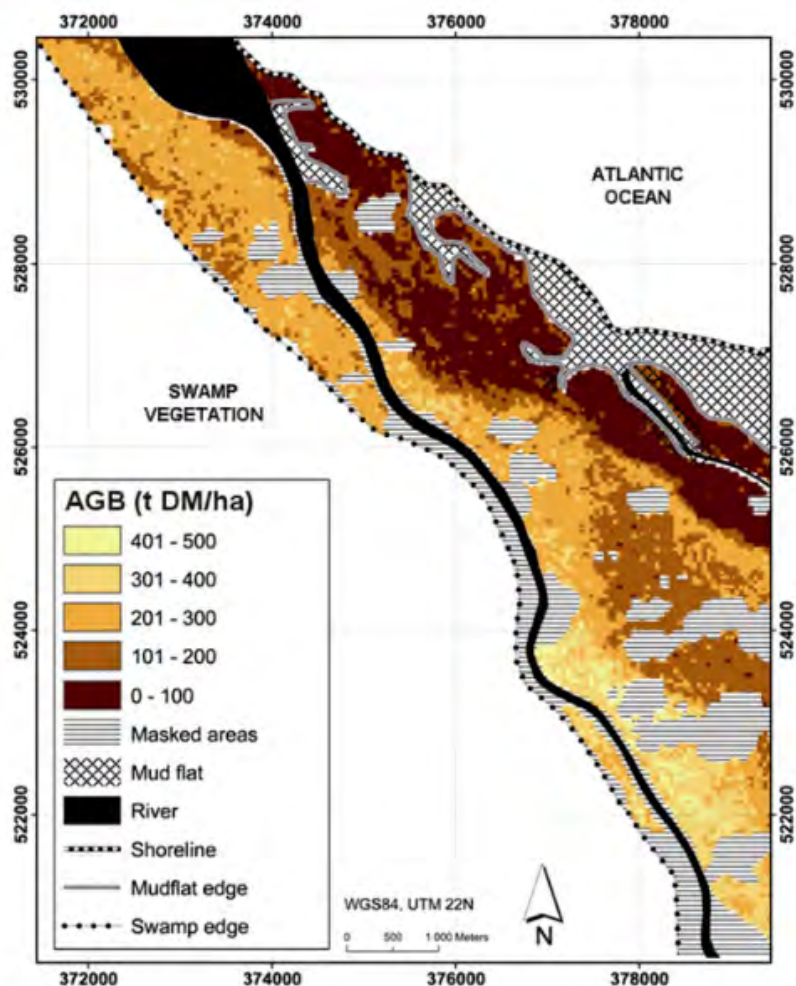


Figure 88 – Cartographie de biomasse des mangroves du site de Kaw (Proisy et al. [2007]). AGB : Above-ground biomass (biomasse aérienne) ; DM : dry matter (matière sèche)

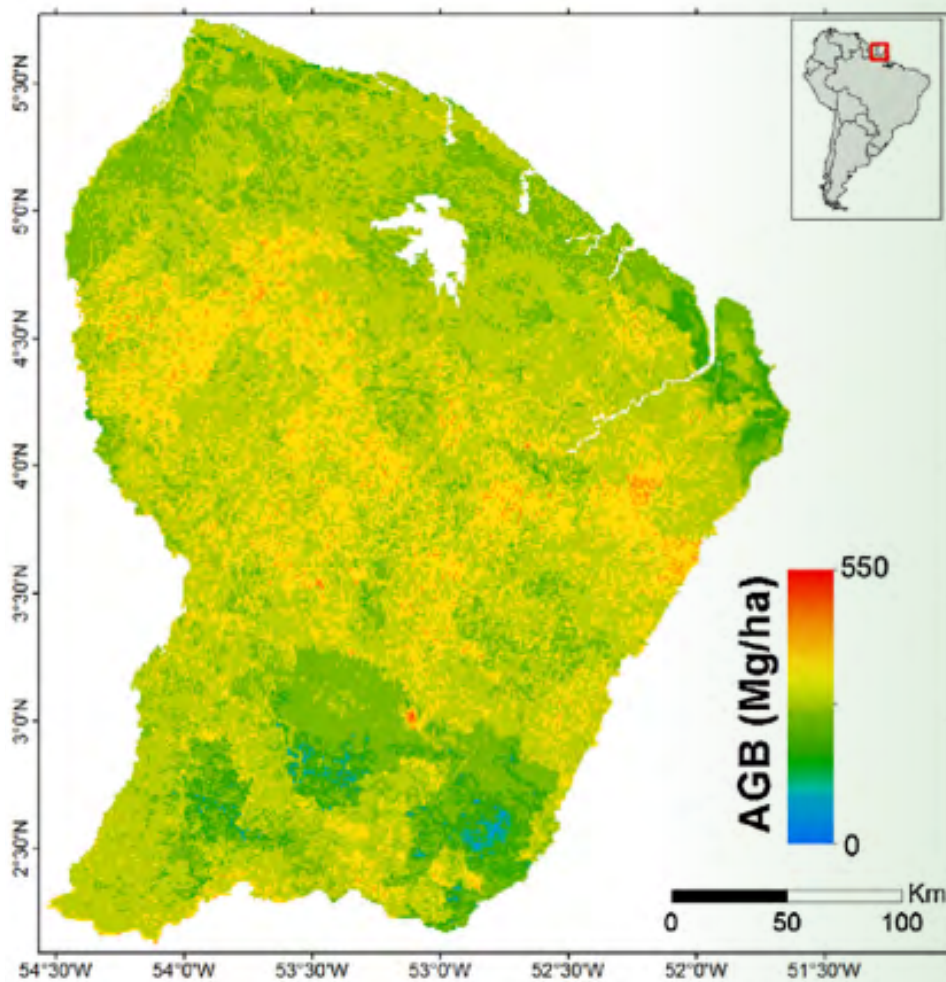


Figure 89 – Carte de distribution de la biomasse vivante aérienne sur le territoire guyanais (Fayad, [2016]). Chaque pixel représente 1 km², et la précision sur l'estimation de la biomasse est de 50 tMS/ha. AGB : above-ground biomass (biomasse aérienne)

Variabilité spatiale du carbone aérien forestier

Pour rappel, la fraction moyenne de carbone dans la biomasse vivante est fixée à 50 % (GIEC (2006)). Ainsi, le stock de CA d’une forêt est directement lié à son stock de biomasse aérienne. La carte de distribution des biomasses aériennes sur le territoire, produite par Fayad (2016), a permis de mettre en évidence une importante variabilité spatiale conduisant à une variation des stocks de CA allant de 75 tC/ha à 250 tC/ha.

Les travaux de Guitet et al. (2013, 2015ab) montrent que les paysages géomorphologiques (caractérisés à partir de variables liées à la topographie, l’hydrographie, le climat, la végétation, la géomorphologie et la géologie) sont les principaux déterminants de la variation des stocks de CA observée à l’échelle du territoire (Figure 90). Les forêts de plateaux et de montagnes au centre de la Guyane et à fort niveau de diversité d’espèces (diversité alpha) présentent les stocks les plus importants, avec des valeurs jusqu’à 250 tC/ha (en rouge et jaune). Les habitats des reliefs multiconvexes (les collines), des vallées et de la plaine côtière plus au nord se situent à un niveau intermédiaire de 150 tC/ha (en vert foncé), avec des variations locales jusqu’à 187,5 tC/ha (en vert clair). Enfin, les paysages multiconcaves (les dépressions) au sud présentent les stocks les moins élevés du territoire, entre 75 et 150 tC/ha (en violet).

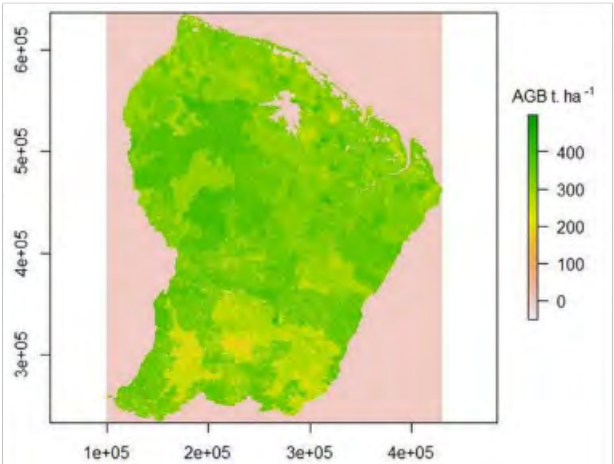
Dans chacun de ces habitats des variations sont également observées à une échelle spatiale plus fine en fonction de la topographie ; les stocks de CA sont plus faibles dans les bas-fonds (Ferry et al. (2010)).



Troupeau dans un pâturage de la région de Macouria [crédit photo : V. Blanfort]

Figure 90 - Cartes de distribution de la biomasse forestière et du carbone aérien sur le territoire guyanais selon les paysages géomorphologiques. [Guitet et al. (2013, 2015ab)].

Type de paysage géomorphologique	Stocks de biomasse aérienne (tMS/ha)	Stocks de CA (tC/ha)
Plateaux et de montagnes 	300 - 500	150 - 250
Reliefs multi convexes, vallées et plaine côtière 	300 - 375	150 - 187,5
Forêts des habitats multi concaves 	150 - 300	75 - 150



Impact des changements climatiques sur le carbone aérien

La forêt amazonienne est souvent présentée comme un « puits » de carbone^{XII}, c'est-à-dire capable d'absorber et de stocker à long terme le carbone de l'atmosphère, présent sous forme de CO₂. Pourtant, cette affirmation divise les scientifiques, notamment depuis l'accélération du changement climatique à l'échelle mondiale et en particulier en Guyane^{XIII} (Brienen *et al.* (2015) ; Hubau *et al.* (2020) ; Piponiot (2018)). Le changement climatique pourrait causer des pertes de 3,5 à 5 tC/ha pour le carbone contenu dans la biomasse aérienne forestière, soit 28 à 40,5 millions de tC au total. Il serait aussi à l'origine d'un allongement des temps de régénération de la biomasse après coupe, perturbant fortement les stratégies d'exploitation forestière. Les changements d'usages des sols (déforestation) ainsi que l'exploitation forestière sont également une source importante de perte de capacité de stockage de la forêt.

Effets des variations inter-annuelles du climat sur la dynamique forestière

Comme le reste du monde, la Guyane subit un changement de son climat : une augmentation des températures est observée (+ 1.5°C depuis 1955 en Guyane) et prédite (entre + 1 et +3.5 °C à l'horizon 2071 selon les 2 scénarios les plus extrêmes du GIEC ; Figure 91).

Les effets des variations inter-annuelles du climat sur la dynamique forestière tels qu'observés actuellement peuvent aider à comprendre et modéliser les effets attendus des changements climatiques sur les forêts. En modélisant les effets des années particulièrement sèches ou chaudes sur la dynamique forestière à partir des données actuelles, on peut prédire la dynamique forestière sous différents scénarios de climat futur. La connaissance

XII Voir le Focus - La forêt guyanaise et les enjeux des changements d'usage sur le stockage du carbone aérien et du sol

XIII La Guyane est menacée d'une augmentation générale des températures de l'air et de la fréquence des événements climatiques sévères dont les sécheresses et les inondations. L'augmentation de température est déjà très perceptible en Guyane. On observe + 1°C en 50 ans sur le plateau des Guyanes.

Région de Cacao (crédit photo : Laure Jacob)

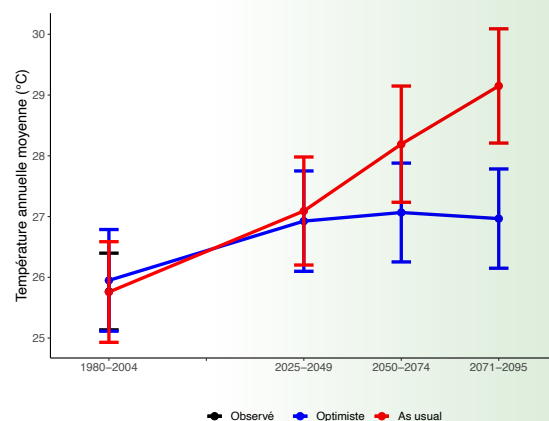
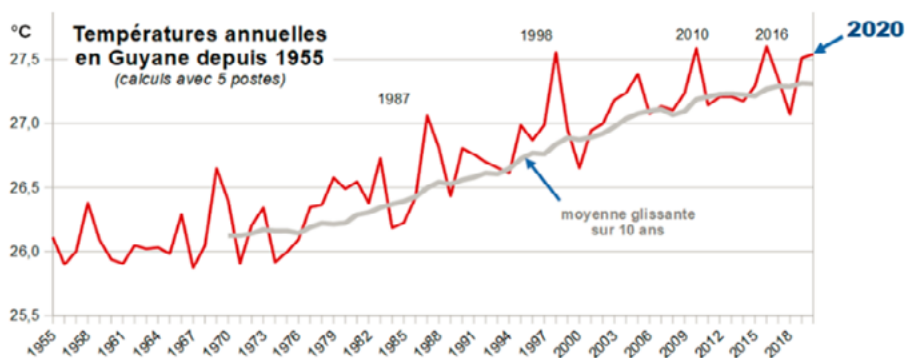


Figure 91 - Evolution des températures annuelles en Guyane depuis 1955 (à gauche) et scénarios de l'évolution des températures jusqu'en 2095 (à droite, GIEC IPCC-CMIP5). Le scénario optimiste est le scénario RCP2.6, le scénario « as usual » est le RCP8.5).

des variations de croissance et de mortalité des arbres en fonction de facteurs climatiques est donc primordiale.

Aubry-Kientz et al. (2015b) ont montré que trois facteurs climatiques annuels étaient impliqués de façon significative dans les variations de croissance et de mortalité annuelles des arbres : la sécheresse, la saturation des sols en eau et la température (Tableau 24).

Conditions de milieu	Impacts sur les arbres
Sécheresse	Diminue la croissance et la mortalité
Augmentation de la température	Diminue la croissance
Fortes précipitations	Augmente la mortalité

Tableau 24 - Effet du climat sur la dynamique forestière [Aubry-Kientz et al. (2015b)].

Cette observation a priori contre-intuitive d’une diminution de la mortalité des arbres avec l’augmentation de la sécheresse s’explique par le fait que la sécheresse participerait à diminuer l’engorgement des sols en eau qui serait à l’origine des chablis en forêt. Aubry-Kientz et al. (2019) et Hiltner et al. (2021) se

sont servis des dynamiques forestières observées en Guyane afin de modéliser les stocks de biomasse aérienne au vu des scénarios climatiques annoncés par les rapports du GIEC. Si le modèle d’Aubry-Kientz et al. (2015a) montre que l’augmentation des températures et la baisse des précipitations conduisent à une diminution de la croissance mais aussi de la mortalité des arbres, d’autres études (Hilner et al. (2021)) montrent que, même dans le cas du scénario le plus optimiste du GIEC (+ 1,5°C), la diminution de croissance serait plus importante que la diminution de mortalité, conduisant à une forte diminution des stocks de biomasse aérienne (Figure 92). Il en résulterait ainsi une diminution de 3,5 à 5 tC/ha des stocks de CA par rapport au climat actuel.

Effet de la variabilité spatiale

En utilisant une autre approche basée sur la variabilité spatiale des stocks de carbone actuellement observée à l’échelle pantropicale, Sullivan et al. (2020) ont produit une carte des changements de stocks de carbone aérien des forêts tropicales mondiales en réponse à une augmentation de la température diurne de l’air de 2°C (Figure 93).

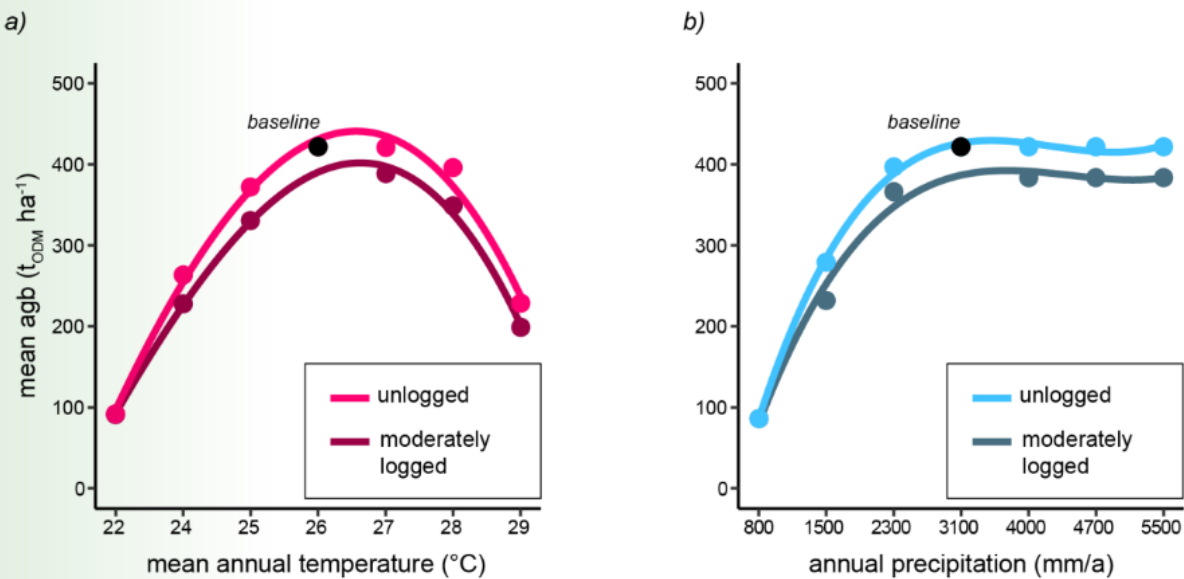


Figure 92 - Biomasse aérienne forestière en fonction des températures annuelles moyennes et des précipitations annuelles, avec (logged) ou sans (unlogged) exploitation forestière [Hilner et al. (2021)] (base line = climat actuel)

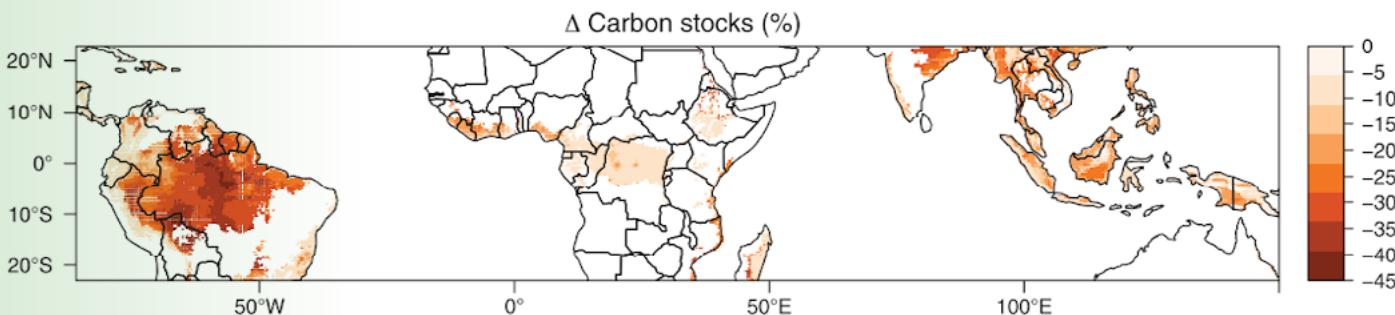


Figure 93 - Changement à long terme des stocks de carbone aérien dû aux seuls effets de la température pour un réchauffement de la température de l’air à la surface du globe de 2°C. [Sullivan et al. (2020)]

Déterminants socio-économiques des stocks de carbone du sol et aérien

Usages des sols agricoles et forestiers : état des lieux

La Guyane présente la particularité d'être un territoire recouvert d'une immense forêt (81 000 km², soit 97,3% de sa surface) qui abrite une biodiversité remarquable, assure un rôle de stockage de carbone et de régulateur climatique régional. La gestion de ce territoire est donc fortement conditionnée à la protection et la préservation de cet « or vert ». Au total, plus de 4 000 ha de forêts sont défrichés chaque année en Guyane (voir Figure 10).

Ce changement d'utilisation des terres concerne trois secteurs principaux : le barrage hydroélectrique de Petit-Saut, l'orpailage et bien sûr l'agriculture, dont le développement est considéré comme une des priorités d'un développement endogène, et pour lequel les décideurs guyanais devront faire des choix déterminants face aux dynamiques démographiques en cours^{XIV}. L'extension de l'agriculture par défriche est déjà la première cause de changement d'usage des sols en Guyane (IGN (2015)) avec une augmentation marquée de la Surface Agricole Utile (SAU) qui passe de 24 000 ha en 2011 à 34 000 ha en 2019 (voir Figure 10). La Guyane est aussi le seul DROM où les productions agricoles augmentent. Pour autant la cou-

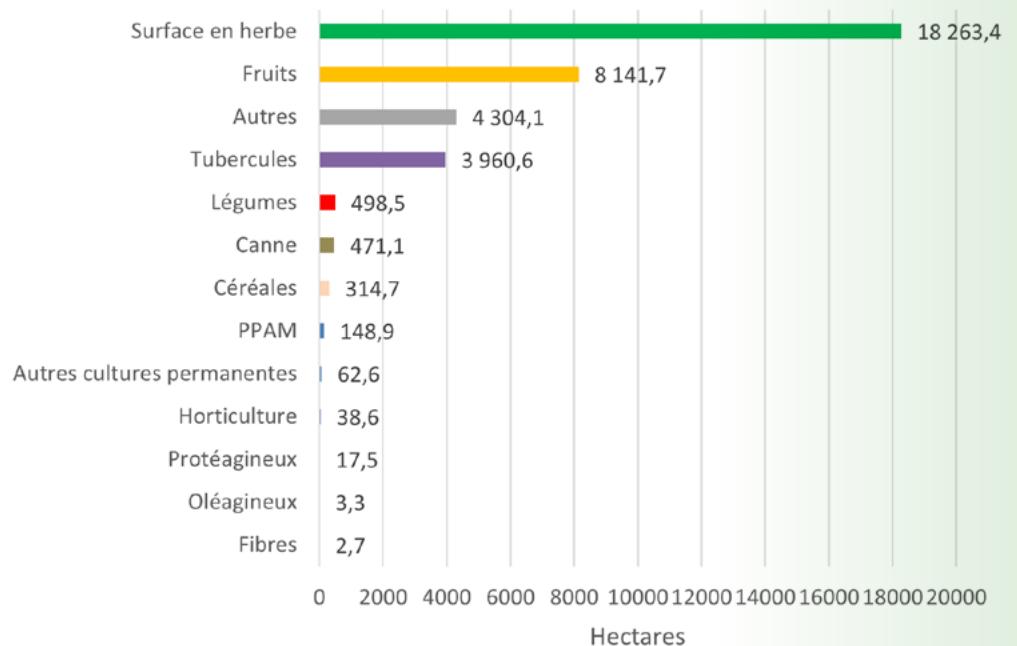
verture des besoins alimentaires est encore très faible pour certaines filières notamment pour les produits animaux (entre 10 et 30%), alors que pour les fruits et légumes le taux de couverture atteint 80% (ODEADOM (2021)).

Des scénarii de développement de la Guyane envisagent un taux de recouvrement global des besoins de consommation par la production locale de 50% à l'horizon 2030 (Oréade-Brèche (2014)). Il y est proposé une croissance forte de certaines filières agricoles (l'élevage notamment) pour arriver à une production calquée sur la croissance de la demande. A défaut, l'alternative serait un recours croissant aux importations. Autre marqueur de l'aménagement du territoire, la mise en eau du barrage de Petit-Saut en 1994 a entraîné la conversion de 30 000 ha de forêt en zones humides. Amortie sur 22 ans, elle représentait encore une importante part des changements d'usage des sols annuels entre 1990 et 2012. L'orpailage, quant à lui, serait selon plusieurs études responsable de la déforestation de 25 000 ha de forêts entre 1990 et 2014 (ONF (2015) ; Rahm et al. (2015) ; Lefebvre et Verger (2014) in IGN (2015)).

Si on détaille plus précisément la répartition des surfaces consacrées à l'agriculture (Figure 94), les systèmes d'élevage au pâturage en occupent la moitié (bovins, bubalins et petits ruminants). Les autres productions ayant un poids spatial non négligeable sont les cultures fruitières, les tubercules et le maraîchage. A la différence de la Guadeloupe, la Martinique et La Réunion, la culture de canne est minoritaire en Guyane.

^{XIV} La croissance démographique est la plus élevée d'Europe (3,6% au cours des 10 dernières années) avec une perspective de doublement de la population d'ici 2050 (INSEE (2019)).

Figure 94 - Usages des surfaces agricoles en Guyane.
Source : Recensement Général Agricole 2020



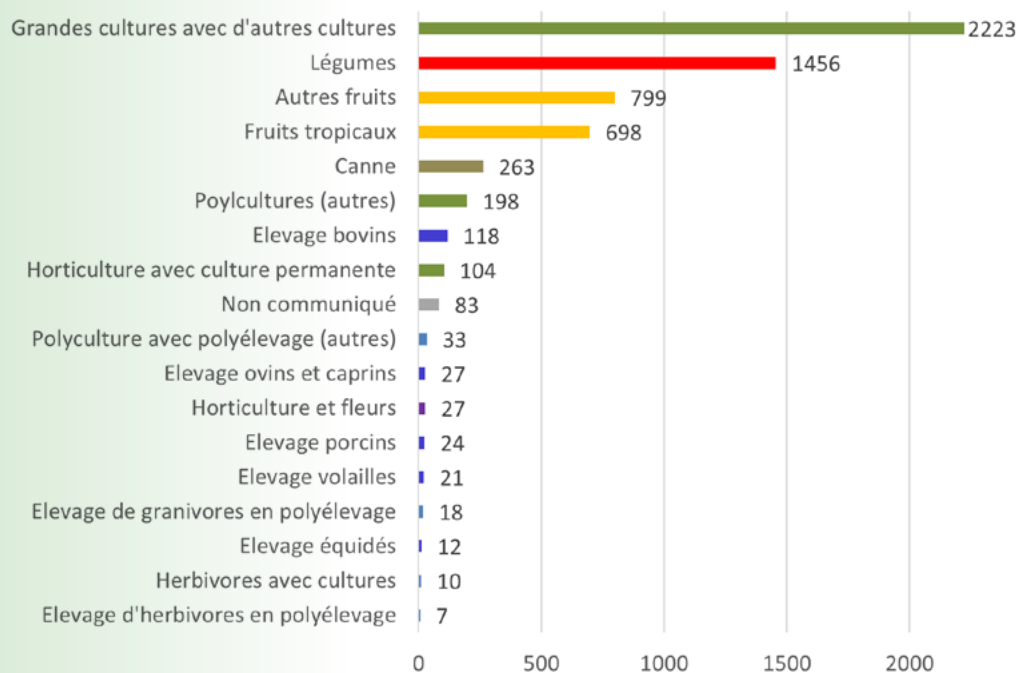


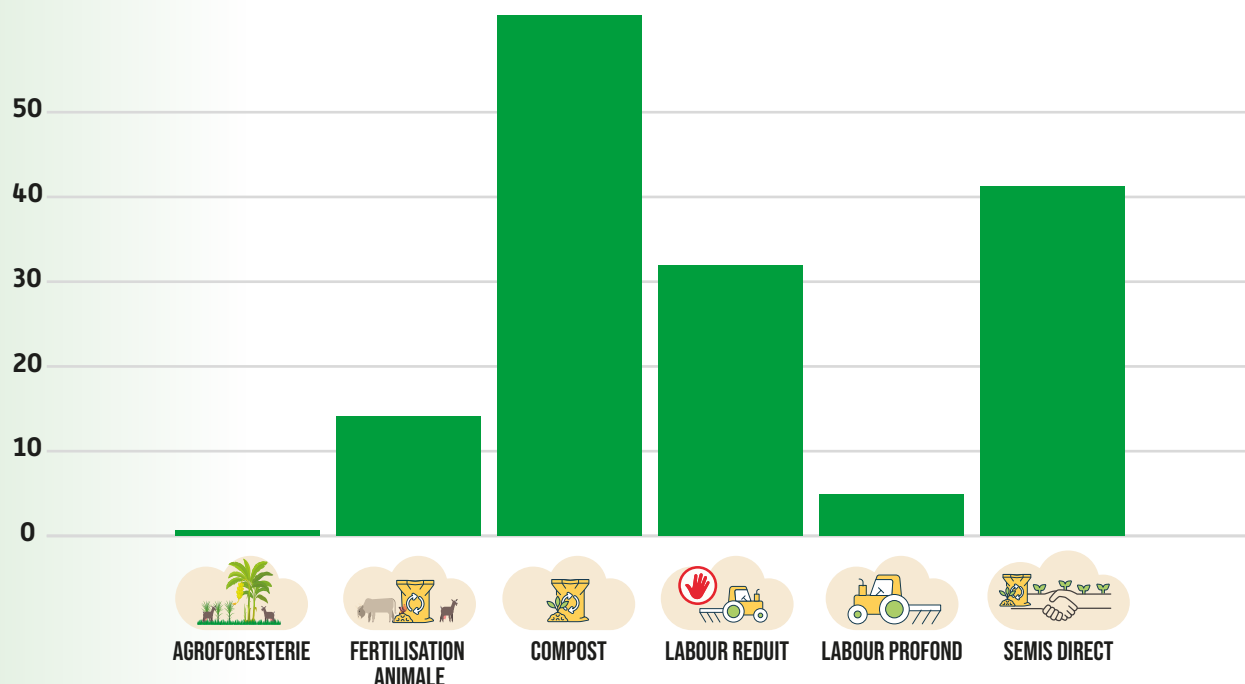
Figure 95 - Orientation productive et spécialisation des exploitations agricoles de Guyane. Chiffres exprimés en nombres d'exploitations. Source : Recensement Général Agricole 2020

Au sein de ces différents systèmes agricoles, les taux d'adoption des pratiques sont contrastés (Figure 95). L'agroforesterie est extrêmement peu développée (seulement 0,7 % des exploitations), ce qui peut surprendre compte tenu de l'importance de la forêt en Guyane. Cela renvoie peut-être à la définition de l'agroforesterie dans le

Recensement Général Agricole, peut-être inadaptée à la situation de la Guyane. Inversement, la pratique de la fertilisation avec des matières organiques (compost) ainsi que les pratiques de labour réduit et de semis direct sont largement adoptées. Le labour profond ne concerne que moins de 5 % des exploitations.

Pratiques agricoles (dé)stockantes : niveau de mise en œuvre

Figure 96 - Taux d'adoption [% des exploitations] des pratiques ayant une influence sur les stocks de carbone des sols agricoles en Guyane. Source : Recensement Général Agricole 2020



Déterminants socio-économiques de l'adoption

Les modèles de régression logistique utilisés pour identifier les déterminants socio-économiques de ces adoptions de pratiques montrent des résultats significatifs seulement pour le labour profond et le semis direct.



AGROFORESTERIE

Les variables qui influencent positivement l'adoption de cette pratique sont un niveau de formation générale élevé et la perspective de reprise de l'exploitation agricole.



FERTILISATION AVEC EFFLUENTS ANIMAUX

La faible fréquence de cette pratique est certainement à relier à la conduite des élevages au pâturage sans stabulation, qui rend la collecte des effluents impossible (mais les fèces sont donc directement recyclées dans les prairies). Trois variables influent positivement sur l'adoption de cette pratique : la commercialisation en circuit court, la pratique du labour profond, et l'âge de l'exploitant. Les variables qui influencent négativement l'adoption de cette pratique sont la très faible dimension économique (PBS < 2000 €) de l'exploitation, le suivi de formations plutôt courtes ou l'absence de formation.



FERTILISATION AVEC COMPOST

De toutes les pratiques analysées, la fertilisation organique est la plus répandue en Guyane (plus de trois exploitations sur cinq). Hormis le type « bovins », tous les autres types d'exploitation sont très significativement favorables à cette fertilisation. De fait, de nombreuses variables ont une influence positive : le temps partiel sur l'exploitation, la reprise de l'exploitation envisagée, la commercialisation en circuit court, la pratique du labour réduit ou du semis direct.



Éleveur et son troupeau en Guyane (crédit photo : V. Blanford)

Projet CARPAGG pédothèque d'échantillon de sol (crédit photo : JPG)



LABOUR PROFOND

Cette pratique est, sans surprise, très corrélée aux zones à faibles contraintes naturelles. Le labour profond, pratique rare (4,9 % des exploitations) se rencontre pour les types « canne » et « légumes ». Les variables qui influencent positivement l'adoption de cette pratique sont le fait d'être dans une classe de dimension économique élevée (PBS entre 50 000 et 250 000 €), d'avoir recours à l'usage de fertilisants minéraux ainsi qu'une formation agricole courte. A contrario, les petites exploitations (PBS < 2000€) n'ont pas recours au labour profond.



LABOUR RÉDUIT

Cette pratique est très positivement déterminée par le fait d'être en zone avec des contraintes naturelles importantes. Tous les types d'exploitation, à l'exception de celles élevant des bovins, sont favorables à cette pratique, notamment de façon très nette pour le type « autres polycultures » et le type « horticulture + cultures permanentes ». Cette pratique semble relativement fréquente dans toutes les exploitations ayant des cultures, de dimension petite à moyenne, avec de la main d'œuvre disponible.



SEMS DIRECT

Cette pratique se rencontre fréquemment (41,2 % des exploitations) et arrive en seconde position après la fertilisation organique. Elle est présente surtout en maraîchage et sur les types « grandes cultures + autre cultures », puis « canne à sucre ». Les variables qui ont une influence positive pour cette pratique sont en premier le fait que l'exploitant est à temps partiel sur l'exploitation et l'appartenance aux classes de dimension économique moyenne à forte. Suivent la commercialisation en circuit court, la fertilisation organique mais aussi la présence d'une main d'œuvre non familiale. En synthèse, cette pratique semble donc essentiellement associée aux exploitations de « cultures », de dimension moyenne à forte, avec recours à de la main d'œuvre d'origine non familiale.

Enjeux et pistes de réflexion pour la Guyane

Les déterminants socio-économiques évoqués ci-dessus sont fortement liés aux enjeux globaux impliquant les sols, notamment leur capacité à soutenir un développement durable des productions agricoles tout en contribuant aux objectifs d'augmentation des stocks de carbone organique du sol (Blanfort et al. (2015)). En Guyane, les problématiques de gestion du stock et des flux de carbone et de GES vont représenter des enjeux majeurs dans les années à venir au niveau local, régional et européen pour les secteurs des terres en général, et notamment la forêt. Par la double appartenance de la Guyane au contexte amazonien et aux cadres réglementaires européen et français, et du fait que son développement s'appuie en partie sur la déforestation, ce territoire d'Outre-mer doit désormais s'inscrire dans une démarche d'atténuation du changement climatique. Le secteur du changement d'utilisation des terres en Guyane est actuellement un élément non négligeable de la comptabilité nationale carbone. Il s'agit plus globalement de s'inscrire dans la Trajectoire Outre-mer 5.0, notamment sur l'objectif Zéro carbone, en conformité avec les engagements internationaux en matière de climat de l'Accord de Paris, ou de développement durable de l'Agenda 2030.

Un enjeu de conservation majeure de la biodiversité et des stocks de carbone

L'Amazonie française représente un enjeu de conservation majeur au regard de l'étendue et de la biodiversité de sa forêt. Elle est aussi l'objet d'une exploitation sélective qui alimente le troisième secteur économique de Guyane. Elle représente des enjeux sur le plan du stockage de carbone pour la France et l'Union européenne dans deux compartiments principaux. **La biomasse aérienne forestière constitue un stock de carbone aérien de 1 320 millions de tonnes**, qui représente 50 % du carbone aérien de l'ensemble des forêts françaises (métropole + Outre-mer). Il faut y ajouter le **stock de carbone organique contenu dans les sols forestiers, compris entre 612 et 891 millions de tonnes**, et plus globalement le stock de COS de l'ensemble du territoire qui représente de 13 à 19 % des stocks de carbone des sols de métropole.

Concilier développement et enjeux environnementaux

Le développement de la Guyane se réalise essentiellement à partir de la défriche de sa forêt. **Ses stocks de carbone sont donc impactés par les changements d'utilisation des terres qui entraînent une perte nette de carbone aérien et, dans la plupart des situations, une diminution des stocks de carbone du sol.** L'extension de l'agriculture en est la première cause. La voie « développement local », généralement partagée par les décideurs locaux, repose sur diverses options, notamment le recours à la création raisonnée de nouvelles surfaces issues de la déforestation, la valorisation de surfaces déjà déforestées, l'amélioration de la rentabilité et de la productivité des exploitations agricoles existantes. Chacune de ces options devrait être envisagée dans un souci de préservation des stocks de carbone et nous proposons dans le paragraphe suivant quelques recommandations dans ce sens.



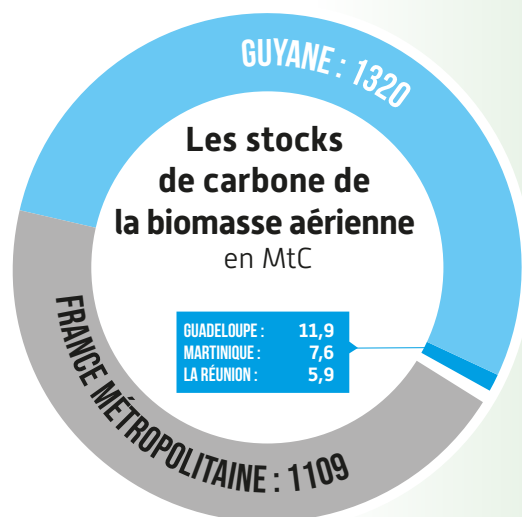
Une option consiste en une extension des surfaces agricoles par de nouvelles défriches. La conférence régionale sur l'agriculture, en 2014, évoque « la nécessité de la création raisonnée de nouvelles surfaces issues de la déforestation ». Les pratiques de défriche mobilisées impactent l'évolution du COS et plus largement les qualités physico-chimiques des sols.

La défriche manuelle est préférable à la défriche mécanisée. Si cette dernière est réalisée, elle devra être conduite au moins :

1. sans décaper l'horizon de surface du sol (le plus riche en matière organique) ;
2. en saison sèche pour limiter le tassement du sol ;
3. et en broyant les rémanents pour laisser un mulch à la surface du sol qui le protège de l'érosion.

Les bénéfices agronomiques de la défriche avec brûlis (enrichissement des sols en minéraux fertilisants) sont aujourd'hui remis en question (pertes de micro et macrofaune, d'azote, etc.). **Les méthodes de défriche sans brûlis « chop-and-mulch » (« hacher et pailler ») seront préférées** même si elles n'ont pas un impact significatif durable sur l'évolution des stocks de COS. En effet, l'apport de débris de bois laissés au sol ou de BRF conduit à une augmentation des stocks de COS qui disparaît 5 années après la défriche. **Un fort enjeu existe sur la valorisation de la biomasse aérienne, en bois d'œuvre ou en production d'énergie, qui peut réduire de 30 % le bilan carbone de la déforestation**, conciliant ainsi le développement agricole

Pâturage en Guyane (crédit photo : V. Blanfort)



velles surfaces. Une intensification écologique basée sur les processus naturels du sol (préservation de la matière organique) améliore la fertilité tout en protégeant le carbone du sol. Dans les systèmes d'élevage à l'herbe, des modes de gestion basés sur un pâturage tournant conduisent à une production d'herbe plus élevée et durable, et sont donc favorables à un stockage de carbone du sol dans les horizons profonds (30 cm – 100 cm) au-delà de 20 ans après déforestation.

Gérer les forêts pour produire du bois et préserver la biodiversité et les puits de carbone

Dans le domaine de la forêt et de la filière bois, il s'agit de trouver des modes d'exploitation permettant d'augmenter la production de bois pour faire face à la demande locale, tout en préservant la biodiversité des écosystèmes et les puits de carbone. **L'utilisation de techniques d'exploitation à faible impact peut réduire de 50 % les dommages sur les stocks de carbone aérien de la forêt.** L'exploitation intensive sur de faibles surfaces est une meilleure stratégie pour réduire le bilan carbone par rapport à une exploitation modérée sur de grandes surfaces. La mise en place complémentaire de plantations d'arbres sur des surfaces déjà déforestées, ainsi qu'une valorisation des connexes d'exploitation et de transformation pour l'énergie, apparaît comme un scénario capable d'assurer une production de bois durable sur le plan de l'approvisionnement et de l'impact sur les stocks de carbone aérien.

Le rôle des politiques publiques pour soutenir les « bonnes pratiques »

Enfin, l'ensemble de ces recommandations sous formes de « bonnes pratiques » ne peut se concevoir sans la mise en place de politiques publiques les soutenant et adaptées au territoire de la Guyane. Cela passe entre autres par des mesures de soutien. En tant que région ultrapériphérique de l'Europe, la Guyane bénéficie d'aides financières de l'Union européenne qui présentent des dispositions spécifiques, concernant notamment la Politique Agricole Commune, la politique commune de la pêche et le régime applicable aux aides d'Etat. L'impératif de développement durable de la Guyane devrait ainsi pouvoir s'appuyer notamment sur la mobilisation de mesures prenant en compte les caractéristiques écologiques, techniques et socio-économiques de ce territoire évoquées dans notre étude.

et celui d'une filière biomasse-énergie. Un zonage ciblé des zones à défricher doit aussi tenir compte de la nécessité de protéger les écosystèmes à fort potentiel de stockage de carbone du sol.

L'option d'extension des surfaces agricoles par de nouvelles défriches ne devrait pas être privilégiée du fait de l'existence de surfaces déjà déforestées mais non mises en valeur comme prévu dans les cahiers des charges des attributions de terres domaniales. La superficie de ces zones déjà déforestées est loin d'être négligeable. Elle est évaluée à 2 500 ha. Une autre option consiste donc à remobiliser ces surfaces pour l'usage agricole initialement prévu.

Il existe aussi des terres agricoles dégradées dont la capacité à assurer la fonction de production de biens et services peut être fortement affectée (prairies surpâturées ou sous pâturées, parcelles érodées, ...). **Leur restauration constitue une autre option capable d'augmenter l'offre de surface agricole sans recourir à une déforestation supplémentaire.**

Améliorer l'efficacité des systèmes agricoles guyanais

Concernant les divers systèmes d'exploitation agricole guyanais, la mise en place de pratiques visant à une meilleure efficacité constitue également une option. Il s'agit de privilégier des techniques existantes ou de favoriser l'adoption d'innovations conduisant à augmenter les productions sans recourir à de nou-

Au sein de la présente étude, la synthèse des connaissances sur la Guyane, territoire majoritairement forestier, inclut aussi le carbone aérien de la forêt.

Le territoire en bref

La Guyane française est un département-région d'outre-mer (DROM) de 83 800 km² où vit une population de 295 000 habitants en 2022. C'est la 2^{ème} plus grande région de France et aussi celle avec la plus faible densité (3,5 hab./km²). Cependant sa croissance démographique (la plus élevée d'Europe avec 3,6%) préfigure un doublement de la population en 2050.

Son climat est tropical humide, avec une pluviosité annuelle moyenne de 2700 mm et une température moyenne annuelle de 27,3°C peu fluctuante durant l'année. Son relief s'organise en bandes parallèles au rivage, avec des « terres hautes » à l'intérieur (plateau des Guyanes d'altitude moyenne de 100 à 200 m) et les « terres basses » de la bande côtière (6% de la superficie) où se concentre plus de 95% de la population. On y trouve la majorité des terres agricoles et certains milieux naturels inféodés au littoral (savanes, mangroves).

Le territoire guyanais est recouvert à 97,3% par une forêt tropicale humide, essentiellement localisée sur les terres hautes. Bien que très préservée, cette

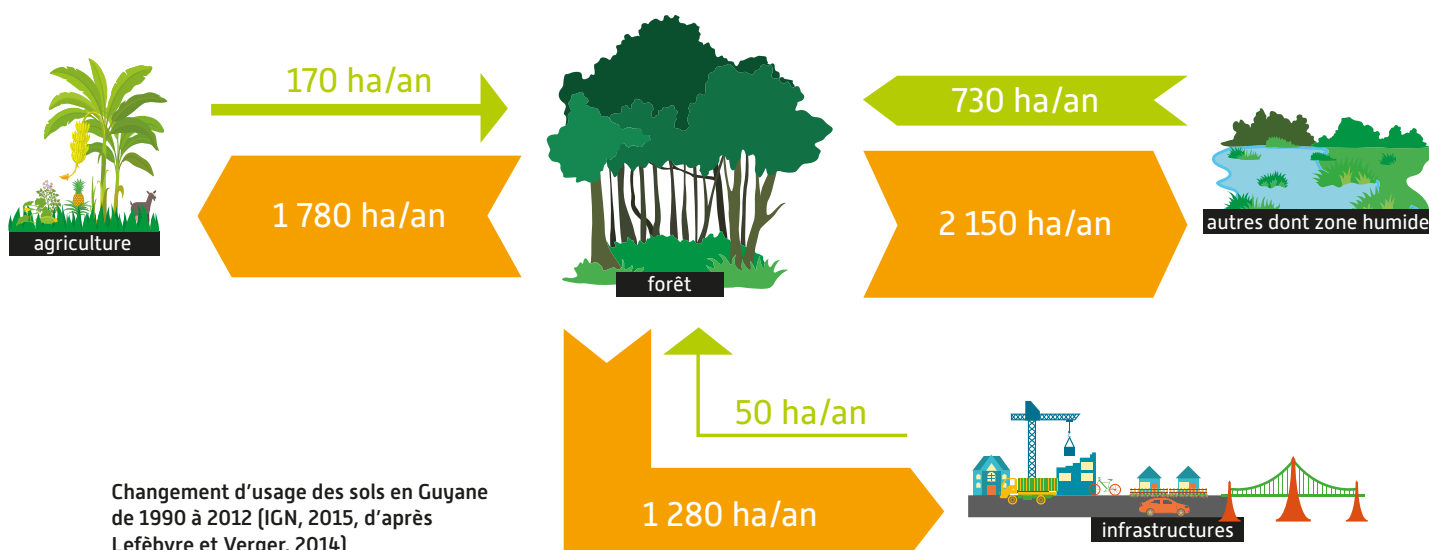
forêt est soumise à des changements d'utilisation des terres sous forme de défrichement, notamment au bénéfice de l'agriculture. **La Guyane est en effet le seul département français qui connaît une augmentation de la SAU et du nombre d'exploitations** (respectivement +9% et +13% entre 2000 et 2010). En 2020, 6135 exploitations agricoles occupaient 364 km², soit 0,4 % du territoire. L'agriculture est caractérisée par la coexistence d'une agriculture traditionnelle itinérante sur brûlis à vocation vivrière et d'une agriculture marchande mécanisée. Les principales productions en termes de surface sont les systèmes herbagers (53%), les tubercules (22%), les fruits et légumes (22%).

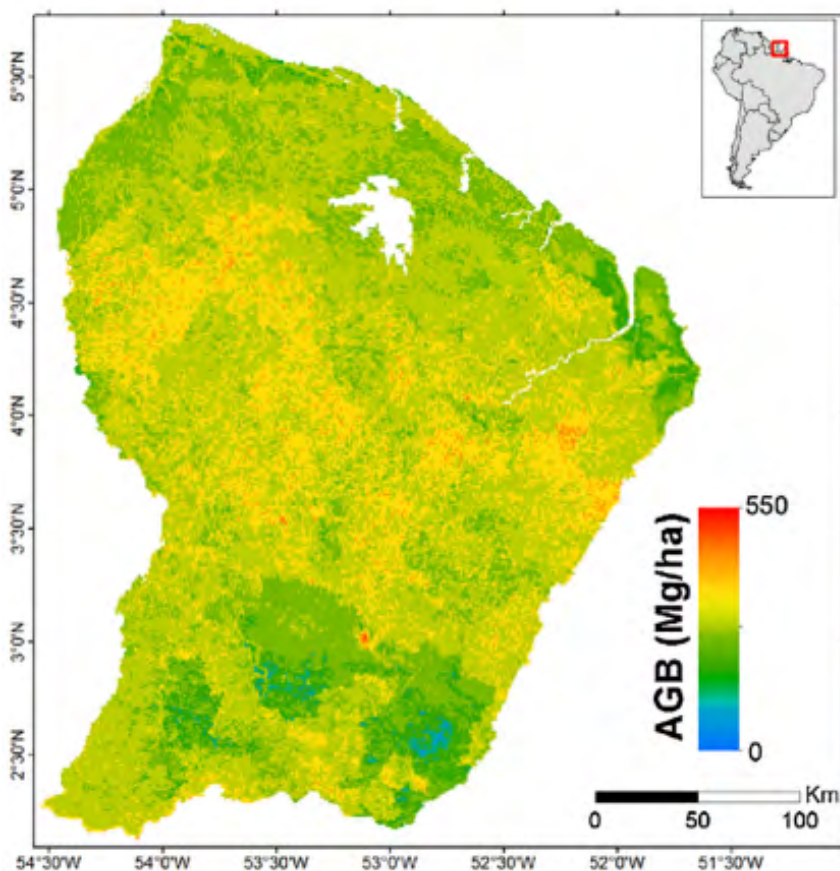
L'orpillage est aussi responsable de la déforestation de 250 km² de forêts entre 1990 et 2014 (1000 ha/an) qui s'est accélérée entre 2001 et 2015 (1300 ha/an). La mise en eau en 1994 du barrage hydroélectrique de Petit-Saut a représenté le plus gros changement d'affectation de sols de la Guyane (immersion de 320 km² de forêts). Le rejet de gaz à effet de serre (GES) par hectare en Guyane est proche de celui des États-Unis, principalement dû au changement d'affectation des sols (conversion de forêt en surface agricole, urbaine, etc).

Principaux déterminants des stocks de carbone aérien et du sol et leur spatialisation

La forêt guyanaise est parmi les moins fragmentées du monde et constitue le plus grand massif forestier de l'Union européenne (UE) (81 000 km²). Sa biodiversité remarquable (5 500 espèces végétales, plus de 1400 espèces animales sans les insectes) représente un enjeu de conservation majeur pour la France et l'UE. Elle est aussi l'objet d'une exploitation sélective (80 000 m³/an de grumes) et alimente le 3^{ème} secteur économique de Guyane. Enfin, concernant l'objet même de la présente étude, la Guyane (« Amazonie française ») représente des enjeux importants sur le plan du stockage de carbone et de la régulation climatique régionale. **Le stock de carbone forestier en Guyane se répartit en moyenne de la façon suivante : 30 % dans le sol, 52 % dans la biomasse vivante aérienne, 13 % dans les racines, 4 % dans le bois mort et 1 % dans la litière.**

La biomasse aérienne constitue un stock de carbone aérien de 1 320 millions de tonnes qui représente **120% du carbone aérien des forêts de l'Hexagone**. La





Carte de distribution de la biomasse vivante aérienne sur le territoire guyanais (Fayad, [2016]). Chaque pixel représente 1 km², et la précision sur l'estimation de la biomasse est de 50 tMS/ha. AGB : above-ground biomass (biomasse aérienne)

forte variabilité spatiale de ces stocks de carbone [75 à 250 tC/ha] est liée à la géomorphologie : les forêts des montagnes et des plateaux centraux concentrent plus de carbone à l'hectare que celles des plaines. Les stocks des mangroves varient en fonction de leur âge, 0 à 50 tC/ha pour les récentes et de 200 à 250 tC/ha pour les plus âgées.

Si la **biomasse forestière** constitue un stock avéré de carbone, est-elle pour autant un puits de carbone absorbant du CO₂ de l'atmosphère à travers la photosynthèse ? Les résultats de la tour à flux Guyaflux [station de recherche de Paracou] et les inventaires forestiers menés sur les placettes permanentes du réseau Guyafor soutiennent ce rôle de puits : la tour à flux a mesuré un flux de carbone entrant dans l'écosystème de 3 tC/ha/an en moyenne entre 2004 et 2015, et les inventaires montrent une augmentation du stock de carbone aérien. Cependant, **les études menées à plus large échelle suggèrent que ce puits de carbone ralentit et risque même de s'inverser sous l'effet du changement climatique** et entraîner des pertes de 3,5 à 5 tC/ha/an dans la biomasse aérienne forestière (28 à 40,5 millions de tC sur l'ensemble du territoire). Il serait aussi à l'origine d'un allongement des temps de régénération de la biomasse après coupe, perturbant fortement les stratégies d'exploitation forestière.

La Guyane est également un territoire où le **stock de carbone organique dans les sols (COS)** est très élevé puisqu'il représente 19 % des stocks de carbone des sols de métropole. Le stock global de COS forestier, sur la couche 0-100 cm, sur l'ensemble du territoire de la Guyane est compris entre 612 et 891 millions de tC. Sa variabilité spatiale est liée à la géomorphologie du territoire et au type de

sol. Les Ferralsols des plateaux présentent les stocks les plus élevés [autour de 130 tC/ha] et les Podzols, dits « sables blancs » du littoral, les plus faibles [autour de 50 tC/ha].

Enjeux et pistes de réflexion sur le stockage de carbone dans la biomasse et les sols en Guyane

Le développement de la Guyane se réalise par un changement d'utilisation des terres où la défriche de la forêt entraîne une perte du carbone aérien, et dans la plupart des situations, une diminution des stocks de carbone du sol. L'exploitation forestière, quant à elle, est à l'origine d'importantes pertes de carbone aérien qui mettent plusieurs décennies à se reconstituer. Ces pertes sont dues à l'exploitation en elle-même et aux impacts indirects [création de layons d'accès, parc à grumes, ...] : les volumes de bois des dégâts d'exploitation peuvent représenter 2, à plus de 4 fois, les volumes exploités. La mise en eau en 1994 du barrage hydroélectrique de Petit-Saut a entraîné quant à elle l'immersion de 10 millions de tonnes de carbone (dont 42 % dans le sol). Aujourd'hui, on considère que la moitié du COS du réservoir a été rejeté sous forme de CO₂ et de méthane [CH₄]. Concernant l'orpaillage, outre la perte de carbone aérien par déforestation, les stocks de COS sur la couche 0-100 cm de sites réhabilités ou revégétalisés depuis 10 ans, étaient respectivement 50% à 25% plus faibles que ceux de la forêt environnante.

L'extension de l'agriculture est la première cause de changement d'usage des sols en Guyane.

Au-delà de l'effet indiscutable de la déforestation sur les pertes de carbone aérien, elle conduit à moyen terme à des évolutions différentes du carbone du sol par rapport au COS initial de la forêt. Le dispositif de recherche CarsGuy a montré une perte de carbone du sol, sur la couche 0-30 cm, :

- de 20 à 60% dans les systèmes agricoles intensifs mécanisés à fort intrants, 2 à 6 ans après la défriche ;
- de 13% dans les cultures annuelles [maïs/soja] avec ou sans labour, 5 ans après déforestation ;
- de 30 % dans un système traditionnel défriché depuis 30 ans.

Ce même dispositif a montré que des pratiques à faible impact conduisent à une augmentation du COS pouvant atteindre 40 tC/ha, 20 ans après la défriche. Dans le cas d'une prairie fauchée, on observe un maintien du COS à un niveau similaire à celui de la forêt, 5 ans après déforestation. Les tours à flux du projet CARPAGG, installées sur des prairies pâturées par des bovins, enregistrent un stockage

potentiel de $1,27 \pm 0,37$ tC/ha/an. L'accumulation de carbone, sous forme stabilisée, se réalise dans les horizons inférieurs, entre 0,3 et 1 m de profondeur, pour atteindre 25 ans après déforestation un stock de COS [0-1m de profondeur] équivalent ou supérieur (118 ± 10 tC/ha) à celui des forêts d'origine (100 ± 7 tC/ha).

Le développement de la Guyane se réalise essentiellement à partir de la défriche de sa forêt. Ses stocks de carbone sont donc impactés par les changements d'utilisation des terres qui entraînent une perte nette de carbone aérien et, dans la plupart des situations, une diminution des stocks de carbone du sol. L'extension de l'agriculture en est la première cause. La voie « développement local », généralement partagée par les décideurs locaux, repose sur diverses options, notamment le recours à la création raisonnée de nouvelles surfaces issues de la déforestation, la valorisation de surfaces déjà déforestées, l'amélioration de la rentabilité et de la productivité des exploitations agricoles existantes. Chacune de ces options devrait être envisagée dans un souci de préservation des stocks de carbone et nous proposons dans le paragraphe suivant quelques recommandations dans ce sens.

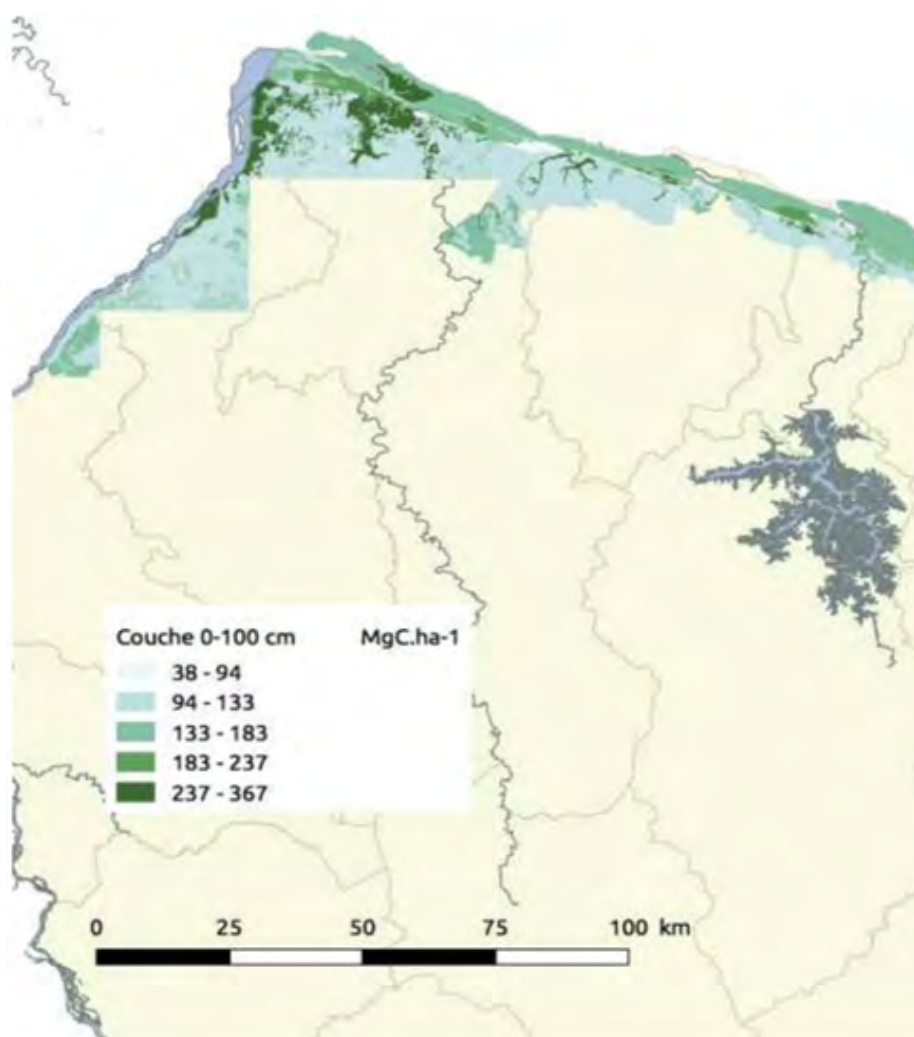
Une option consiste en une extension des surfaces agricoles par de nouvelles défriches. La conférence régionale sur l'agriculture, en 2014, évoque « la nécessité de la création raisonnée de nouvelles surfaces issues de la déforestation ». Les pratiques de défriche mobilisées impactent l'évolution du COS et plus largement les qualités physico-chimiques des sols. **La défriche manuelle est préférable à la défriche mécanisée.** Si cette dernière est réalisée, elle devra être conduite au moins (i) sans décaper l'horizon de surface du sol (le plus riche en matière organique) ; (ii) en saison sèche pour limiter le tassement du sol ; (iii) et en broyant les rémanents pour laisser un mulch à la surface du sol qui le protège de l'érosion. Les bénéfices agronomiques de la défriche avec brûlis (enrichissement des sols en minéraux fertilisants) sont aujourd'hui remis en question (pertes de micro et macrofaune, d'azote, etc.). **Les méthodes de défriche sans brûlis « chop-and-mulch » (« hacher et pailler ») seront préférées** même si elles n'ont pas un impact significatif durable sur l'évolution des stocks de COS. En effet, l'apport de débris de bois laissés au sol ou de BRF conduit à une augmentation des stocks de COS qui disparaît 5 années après la défriche. **Un fort enjeu existe sur la valorisation de la biomasse aérienne, en bois d'œuvre ou en production d'énergie, qui peut réduire de 30 % le bilan carbone de la déforestation,** conciliant ainsi

le développement agricole et celui d'une filière biomasse-énergie. Un zonage ciblé des zones à défricher doit aussi tenir compte de la nécessité de protéger les écosystèmes à fort potentiel de stockage de carbone du sol.

L'option d'extension des surfaces agricoles par de nouvelles défriches ne devrait pas être privilégiée du fait de l'existence de surfaces déjà déforestées mais non mises en valeur comme prévu dans les cahiers des charges des attributions de terres domaniales. La superficie de ces zones déjà déforestées est loin d'être négligeable. Elle est évaluée à 2 500 ha. Une autre option consiste donc à remobiliser ces surfaces pour l'usage agricole initialement prévu.

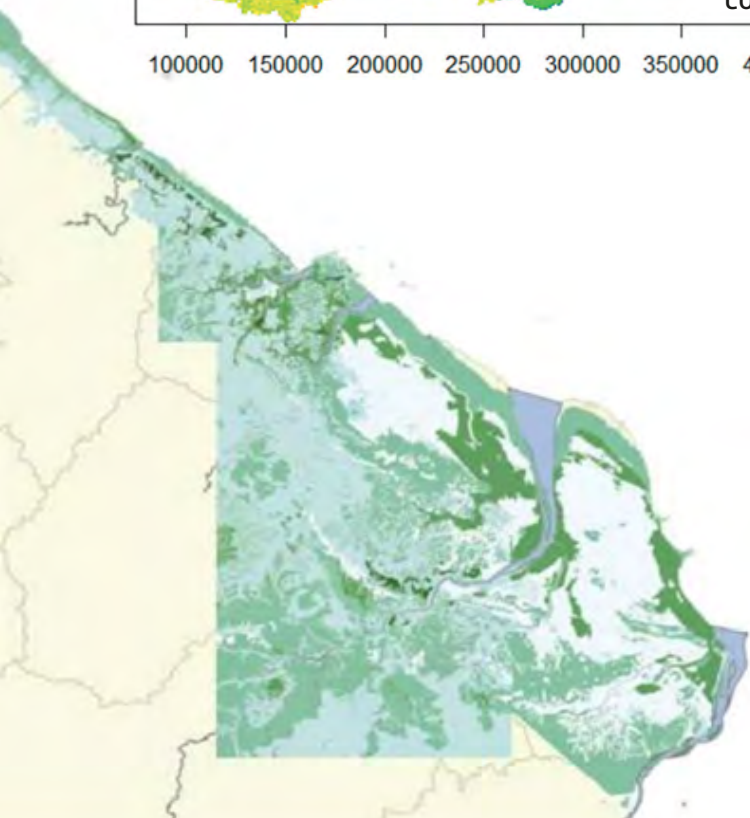
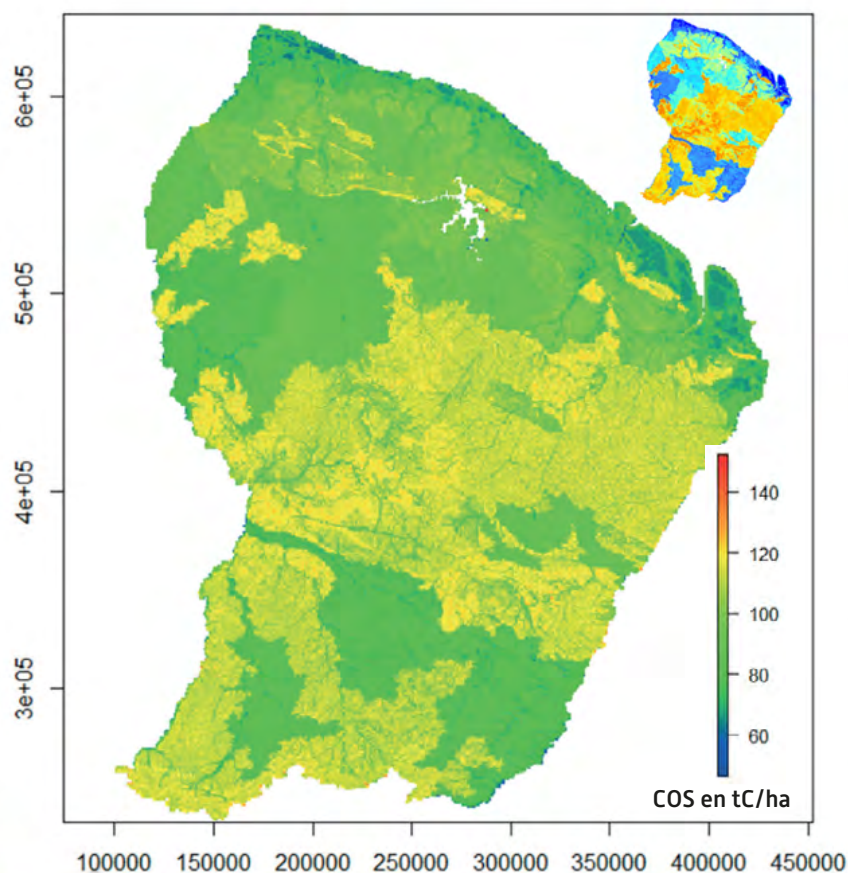
Il existe aussi des terres agricoles dégradées dont la capacité à assurer la fonction de production de biens et services peut être fortement affectée (prairies surpâturées ou sous pâturées, parcelles érodées, ...). Leur restauration constitue une autre option capable d'augmenter l'offre de surface agricole sans recourir à une déforestation supplémentaire.

Concernant les divers systèmes d'exploitation agricole guyanais, la mise en place de pratiques visant à une meilleure efficacité constitue également une option. Il s'agit de privilégier des techniques existantes ou de favoriser l'adoption d'innovations conduisant à augmenter les productions sans recourir à de nouvelles surfaces. **Une intensification écologique basée sur les processus naturels du sol (préservation de la matière organique) améliore la fertilité tout en protégeant le carbone du sol.** Dans les systèmes d'élevage à l'herbe, des



Stocks de carbone de l'horizon 0-100 cm des unités pédologiques du littoral guyanais (Courte [20

Stocks de COS (tC/ha) dans l'horizon 0-1m [Guitet et al. (2015)] et carte des types de sol du territoire guyanais en haut à droite (cf. Figure 68) [Guitet et al. (2013)]
 (Pour cette dernière : orange = Geric Ferralsol ; rouge = autre Ferralsol ; vert = Acrisol ; bleu = autre)



modes de gestion basés sur un pâturage tournant conduisent à une production d'herbe plus élevée et durable, et sont donc favorables à un stockage de carbone du sol dans les horizons profonds (30 cm – 100 cm) au-delà de 20 ans après déforestation.

Dans le domaine de la forêt et de la filière bois, il s'agit de trouver des modes d'exploitation permettant d'augmenter la production de bois pour faire face à la demande locale, tout en préservant la biodiversité des écosystèmes et les puits de carbone. **L'utilisation de techniques d'exploitation à faible impact peut réduire de 50 % les dommages sur les stocks de carbone aérien de la forêt.** L'exploitation intensive sur de faibles surfaces est une meilleure stratégie pour réduire le bilan carbone par rapport à une exploitation modérée sur de grandes surfaces. La mise en place complémentaire de plantations d'arbres sur des surfaces déjà déforestées, ainsi qu'une valorisation des connexes d'exploitation et de transformation pour l'énergie, apparaît comme un scénario capable d'assurer une production de bois durable sur le plan de l'approvisionnement et de l'impact sur les stocks de carbone aérien.

Enfin, **l'ensemble de ces recommandations sous formes de « bonnes pratiques » ne peut se concevoir sans la mise en place de politiques publiques les soutenant et adaptées au territoire de la Guyane.** Cela passe entre autres par des mesures de soutien. En tant que région ultrapériphérique de l'Europe, la Guyane bénéficie d'aides financières de l'Union européenne qui présentent des dispositions spécifiques, concernant notamment la Politique Agricole Commune, la politique commune de la pêche et le régime applicable aux aides d'Etat. L'impératif de développement durable de la Guyane devrait ainsi pouvoir s'appuyer notamment sur la mobilisation de mesures prenant en compte les caractéristiques écologiques, techniques et socio-économiques de ce territoire évoquées dans notre étude.



Références bibliographiques

PARTIE « CONTEXTE, MÉTHODOLOGIE, RÉSULTATS ET RECOMMANDATIONS »

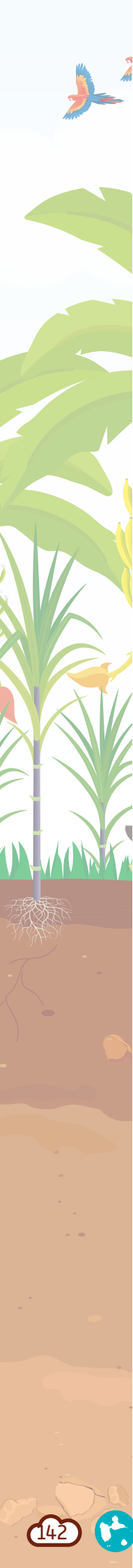
- ADEME (2014). Carbone organique des sols : l'énergie de l'agroécologie, une solution pour le climat, ADEME: 27. <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/3117-carbone-organique-des-sols-l-energie-de-l-agro-ecologie-une-solution-pour-le-climat-9782358384476.html>
- Allo, M., 2019. Usages et changements d'usages des sols agricoles : impacts sur les stocks de carbone organique du sol en milieu volcanique tropical. Approche spatiale et bilan des gaz à effet de serre à l'île de La Réunion. Université de Montpellier. <https://agritrop.cirad.fr/599074/>
- Beaudou, A., Le Martret H., 2004. MIRURAM/VALSOL : un système d'information et une base de données pour représenter les sols tropicaux et leurs environnements. *Etude et Gestion des Sols*, 11 (3), p. 271-284. ISSN 1252-5861. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/10/EGS_11_3_beaudou.pdf
- Blanchart, E., Bernoux, M., 2005. Déterminants des stocks de carbone des sols des Petites Antilles (Martinique, Guadeloupe). Alternatives de séquestration du carbone et spatialisation des stocks actuels et simulés, Rapport du programme GESSOL, IRD. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Montpellier, France.
- Bolinder, M. A., et al. (2007). "An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118(1): 29-42. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.013>
- Clivot, H., Mouny, J.-C., Duparque, A., Dinh, J. L., Denoroy, P., Houot, S., Vertès, F., Trochard, R., Bouthier, A., Sagot, S. & Mary, B. (2019). Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software*, 118 : 99-113.
- Collinet, M., Feder, F., Soulié, J.-C., 2021. Soil analysis data from Laboratoire d'Analyses Agronomiques of Réunion Island Cirad. Dataverse UR 78 Recycl. Risque. <https://doi.org/10.18167/DVN1/EAVAGM>
- Coleman, K. & Jenkinson, D.S. (1996). RothC-26.3-A Model for the turnover of carbon in soil. *Evaluation of soil organic matter models*, Springer.
- Colmet-Daage, F., Bernard, J., Gauthier, J., Gauthier, M., Lagache, F., Grécy, J. de, Poumaroux, A., Pallud, A., 1969. Cartes des sols de la Martinique [cartes des sols des Antilles : feuilles nos 1 à 24]. BSA, Pointe à Pitre. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:29976>
- Conseil Economique pour le Développement Durable, 2010. Les PSE : des rémunérations pour les services environnementaux. N°17 <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/CEDD%20-%20Ref%202017.pdf>
- Courte, A., 2019. Le carbone des sols, la petite agriculture, ses systèmes de production et pratiques, témoins des enjeux environnementaux et agricoles de la Guyane. Université de Guyane. <https://www.theses.fr/2019YANE0010>
- Demento, J., Dayet A., Karsenty A.. (2022). "Surviving the jungle of soil organic carbon certification standards: an analytic and critical review". *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 27:1, <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09980-3>
- Fayad, I., Baghdadi, N., Guitet, S., Bailly, J.-S., Hérault, B., Gond, V., El Hajj, M., & Minh, D. H. T. (2016). Aboveground biomass mapping in French Guiana by combining remote sensing, forest inventories and environmental data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 502-514. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.015>
- Friedlingstein, P., et al. (2022). "Global Carbon Budget 2022." *Earth Syst. Sci. Data* 14(11): 4811-4900. DOI: 10.5194/essd-14-4811-2022
- Guitet, S., 2015. Diversité des écosystèmes forestiers de Guyane française : distribution, déterminants et conséquences en termes de services écosystémiques. Université Montpellier. <https://theses.hal.science/tel-01233446>
- Hothorn T, Buehlmann P, Dudoit S, Molinaro A, Van Der Laan M (2006). "Survival Ensembles." *Biostatistics*, 7(3), 355-373.
- IGN (2015), Indicateurs de gestion durable des forêts ultramarines de Guyane, édition 2015 publiée en 2018
- IPCC (2006). Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Jamoteau, F., 2018. Contribution du carbone des produits résiduels aux matières organiques des sols de la Réunion. Une approche isotopique. (Rapport de Master 1 Hydrogéologie et transferts). Université de Poitiers.
- Jamoteau, F., Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Tillard, E., Versini, A., 2021. Can stable isotopes quantify soil carbon build-up from organic fertilizers? *Isotopes Environ. Health Stud.* 57, 470-491. <https://doi.org/10.1080/10256016.2021.1946532>
- Koch P. and Salou T., 2022. AGRIBALYSE®: Rapport Méthodologique- Volet Agriculture- Version 3.1 ; version initiale v1.0 ; 2014. Ed ADEME, Angers, France. 342 p. URL: <https://doc.agribalyse.fr/documentation/documentation-complete>
- Minasny, B., et al. (2017). "Soil carbon 4 per mille." *Geoderma* 292: 59-86. DOI:10.1016/j.geoderma.2017.01.002
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633-1644, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Pellerin, S., et al. (2019). Stocker du carbone dans les sols français - Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114p.
- Raunet, M., 1988. Département de la Réunion. Carte morpho-pédologique au 1:50 000 en quatre feuilles. Cirad-Irat et région Réunion. <https://doi.org/10.18167/agritrop/00220>, <https://doi.org/10.18167/agritrop/00221>, <https://doi.org/10.18167/agritrop/00222>, <https://doi.org/10.18167/agritrop/00223>
- Roig, J.Y., Moisan, M. (2011) - Inventaire du patrimoine géologique de la Guyane – Partie 2. Rapport BRGM/ RP-60644-FR. 67 p. https://www.guyane.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/RP_60644_PSP11GUY10DEAL_Patrimoine_II.pdf
- Sierra, J., David, D., Causeret, F., Publicol, M., Desfontaines, L., Chopin, P., 2015. Évaluation régionalisée de l'émission et de la séquestration du carbone dans les sols tropicaux de Guadeloupe (TROPEMIS). INRA - Carib Agro. https://hal.inrae.fr/hal-02799820/file/2015_Rapport%20final_TropEmis_1.pdf



- 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 and Environment*, 213 : 252-264.
- Sierra, J., Desfontaines, L., 2018. Les sols de Guadeloupe. Genèse, distribution & propriétés. INRA Antilles-Guyane, Guadeloupe, <https://hal.inrae.fr/hal-02789600/document>
- Strobl C, Boulesteix A, Zeileis A, Hothorn T (2007). "Bias in Random Forest Variable Importance Measures: Illustrations, Sources and a Solution." *BMC Bioinformatics*, 8(25). doi:10.1186/1471-2105-8-25.
- Strobl C, Boulesteix A, Kneib T, Augustin T, Zeileis A (2008). "Conditional Variable Importance for Random Forests." *BMC Bioinformatics*, 9(307). doi:10.1186/1471-2105-9-307.
- Todoroff, P., Albrecht, A., Allo, M., Thuries, L., Tillard, E., 2019. C@RUN : séquestration de carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, modélisation et potentiels d'atténuation du changement climatique. Cirad-IRD. <https://agritrop.cirad.fr/591901/>
- Venkatapen, C., 2012. Etude des déterminants géographiques et spatialisés des stocks de carbone des sols de la Martinique. Université des Antilles et de la Guyane. <http://www.theses.fr/2012AGUY0513/document>
- Viaud, P., 2019. Modélisation de la dynamique de la matière organique des sols en contexte d'apport de produits résiduels organiques à la Réunion (Rapport de stage de Master II). Université de Lorraine.

PARTIE « GUADELOUPE »

- Agreste, 2017. Bulletin de conjoncture 2017. DAAF, Direction de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Forêts. https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Agreste_Conjoncture_-_annee_2017_cle01ff91.pdf
- Agreste, 2021. L'occupation du sol entre 1982 et 2018.
- Agreste Guadeloupe, 2019. Mémento de la statistique agricole. <https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/memento-2019-de-la-statistique-agricole-a960.html>
- Allo, M., 2019. Usages et changements d'usages des sols agricoles : impacts sur les stocks de carbone organique du sol en milieu volcanique tropical. Approche spatiale et bilan des gaz à effet de serre à l'île de La Réunion. Université de Montpellier.
- Barré, P., Fernandez-Ugalde, O., Virto, I., Velde, B., Chenu, C., 2014. Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: incomplete knowledge and exciting prospects. *Geoderma* 235–236, 382–395. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.029>
- Basile-Doelsch, I., Amundson, R., Stone, W.E.E., Masiello, C.A., Bottero, J.Y., Colin, F., Masin, F., Borschneck, D., Meunier, J.D., 2005. Mineralogical control of organic carbon dynamics in a volcanic ash soil on La Réunion. *Eur. J. Soil Sci.* 56, 689–703. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00703.x>
- Blanchart, E., Cabidoche, Y.M., Sierra, J., Venkatapen, C., Langlais, C., Achard, R., 2004. Stocks de carbone dans les sols pour différents agrosystèmes des Petites Antilles. *Cah. PRAM* 4, 31–34.
- Cabidoche, Y.-M., 2000. Cours de genèse des sols de la Caraïbe à l'Université des Antilles. Diaporama.
- Chevallier, T., Fujisaki, K., Rupsard, O., Guidat, F., Kinoshita, R., Melo Viginio Filho, E. de, Lehner, P., Albrecht, A., 2019. Short-range-order minerals as powerful factors explaining deep soil organic carbon stock distribution: the case of a coffee agroforestry plantation on Andosols in Costa Rica. *SOIL* 5, 315–332. <https://doi.org/10.5194/soil-5-315-2019>
- Chevallier, T., Woignier, T., Toucet, J., Blanchart, E., 2010. Organic carbon stabilization in the fractal pore structure of Andosols. *Geoderma* 159, 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.010>
- Chopin, P., Blazy, J.M., Doré, T., 2015. A new method to assess farming system evolution at the landscape scale. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 325–337.
- Chopin, P., Sierra, J., 2021. Potential and constraints for applying the "4 per 1000 Initiative" in the Caribbean: the case of Guadeloupe. *Reg. Environ. Change* 21, 13. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01740-4>
- Chopin, P., Sierra, J., 2019. Reduced tillage and organic amendments can offset the negative impact of climate change on soil carbon: A regional modelling study in the Caribbean. *Soil Tillage Res.* 192, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.009>
- Clermont-Dauphin, C., Cabidoche, Y.-M., Meynard, J.-M., 2004. Effects of intensive monocropping of bananas on properties of volcanic soils in the uplands of the French West Indies. *Soil Use Manag.* 20, 105–113. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00345.x>
- Cruz, P., Guillaume, P., 1999. Croissance et nutrition minérale de la canne à sucre au cours de repousses successives - *Agritrop. Cah. Agric.* 8, 101–107.
- DAAF, 2019. Mémento de la statistique agricole. <https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/memento-2019-de-la-statistique-agricole-a960.html>
- Ducrot, A. and Nohara, N. (2018). Commerce extérieur agroalimentaire. Agreste, DAAF, Direction de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Forêts. <http://daaf971.agriculture.gouv.fr>
- Ducrot, A. and Rousseau, T. (2018). Enquête pratiques culturales banane. Agreste, DAAF, Direction de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Forêts. <http://daaf971.agriculture.gouv.fr>
- Dulormne, M., Sierra, J., Nygren, P., Cruz, P., 2003. Nitrogen-fixation dynamics in a cut-and-carry silvopastoral system in the subhumid conditions of Guadeloupe, French Antilles. *Agrofor. Syst.* 59, 121–129. <https://doi.org/10.1023/A:1026387711571>
- Faucher, V. (2018a). Enquête pratiques culturales canne à sucre. Agreste, DAAF, Direction de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Forêts. <http://daaf971.agriculture.gouv.fr>
- Faucher, V. (2018b). Mémento de la statistique agricole. Agreste, DAAF, Direction de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Forêts. <http://daaf971.agriculture.gouv.fr>
- Huygens, D., Boeckx, P., Van Cleemput, O., Oyarzún, C., Godoy, R., 2005. Aggregate and soil organic carbon dynamics in South Chilean Andisols. *Biogeosciences* 2, 159–174. <https://doi.org/10.5194/bg-2-159-2005>
- Rochette, R., David, D., Sierra, J., 2019. BDD TropEmis & CaribAgro
- Sierra, J., Causeret, F., 2018. Changes in soil carbon inputs and outputs along a tropical altitudinal gradient of volcanic soils under intensive agriculture. *Geoderma* 320, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.025>
- Sierra, J., Causeret, F., Chopin, P., 2017. A framework coupling farm typology and biophysical modelling to assess the impact of vegetable crop-based systems on soil carbon stocks. Application in the Caribbean. *Agric. Syst.* 153, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.004>



- Sierra, J., Causeret, F., Diman, J.L., Publicol, M., Desfontaines, L., Cavalier, A., Chopin, P., 2015a. Observed and predicted changes in soil carbon stocks under export and diversified agriculture in the Caribbean. The case study of Guadeloupe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 213, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.08.015>
 - Sierra, J., Chopart, J.L., Guindé, L., Blazy, J.M., 2016. Optimization of Biomass and Compost Management to Sustain Soil Organic Matter in Energy Cane Cropping Systems in a Tropical Polluted Soil: a Modelling Study. *BioEnergy Res.* 9, 798–808. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9729-z>
 - Sierra, J., David, D., Causeret, F., Publicol, M., Desfontaines, L., Chopin, P., 2015b. Évaluation régionalisée de l'émission et de la séquestration du carbone dans les sols tropicaux de Guadeloupe (TROPEMIS). INRA - Carib Agro.
 - Sierra, J., Desfontaines, L., 2018a. Les sols de Guadeloupe. Genèse, distribution & propriétés. INRA Antilles-Guyane, Guadeloupe.
 - Svanes, E., Aronsson, A.K.S., 2013. Carbon footprint of a Cavendish banana supply chain. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1450–1464. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0602-4>
 - Wang, Y., Yao, Z., Zhan, Y., Zheng, X., Zhou, M., Yan, G., Wang, L., Werner, C., Butterbach-Bahl, K., 2021. Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. *Glob. Change Biol.* 27, 2807–2821. <https://doi.org/10.1111/gcb.15607>
 - Wattel- Koekkoek, E.J.W., Buurman, P., Van Der Plicht, J., Wattel, E., Van Breemen, N., 2003. Mean residence time of soil organic matter associated with kaolinite and smectite. *Eur. J. Soil Sci.* 54, 269–278. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00512.x>
 - Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J.C., Sampson, C.C., Kanae, S., Bates, P.D., 2017. A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.* 44, 5844–5853. <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>
- PARTIE « MARTINIQUE »**
- Agreste, 2021. L'occupation du sol entre 1982 et 2018.
 - Agreste Martinique, 2019. Mémento agricole.
 - Albrecht, A., Rangon, L., Barret, P., 1992. Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). *Cah. ORSTOM Série Pédologie* 27, 121–133.
 - Allo, M., 2019. Usages et changements d'usages des sols agricoles : impacts sur les stocks de carbone organique du sol en milieu volcanique tropical. Approche spatiale et bilan des gaz à effet de serre à l'île de La Réunion. Université de Montpellier.
 - Barthès, B.G., Kouakoua, E., Larré-Larrouy, M.-C., Razafimbelo, T.M., de Luca, E.F., Azontonde, A., Neves, C.S.V.J., de Freitas, P.L., Feller, C.L., 2008. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma* 143, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.10.003>
 - Bartoli, F., Burtin, G., 2007. Organo-mineral clay and physical properties in COST 622 European volcanic soils, in : Arnalds, Ó., Óskarsson, H., Bartoli, F., Buurman, P., Stoops, G., García-Rodeja, E. (Eds.), *Soils of Volcanic Regions in Europe*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 469–491. https://doi.org/10.1007/978-3-540-48711-1_34
 - Basile-Doelsch, I., Amundson, R., Stone, W.E.E., Masiello, C.A., Bottero, J.Y., Colin, F., Masin, F., Borschneck, D., Meunier, J.D., 2005. Mineralogical control of organic carbon dynamics in a volcanic ash soil on La Réunion. *Eur. J. Soil Sci.* 56, 689–703. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00703.x>
 - Blanchart, E., Bernoux, M., 2005. Déterminants des stocks de carbone des sols des Petites Antilles (Martinique, Guadeloupe). Alternatives de séquestration du carbone et spatialisation des stocks actuels et simulés, Rapport du programme GESSOL, IRD. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Montpellier, France.
 - Blanchart, E., Cabidoche, Y.M., Sierra, J., Venkatapen, C., Langlais, C., Achard, R., 2004. Stocks de carbone dans les sols pour différents agrosystèmes des Petites Antilles. *Cah. PRAM* 4, 31–34.
 - Boudot, J.-P., 1992. Relative efficiency of complexed aluminum noncrystalline Al hydroxide, allophane and imogolite in retarding the biodegradation of citric acid. *Geoderma* 52, 29–39.
 - Boudot, J.P., Hadj, B.A.B., Chone, T., 1986. Carbon mineralization in andosols and aluminium-rich highland soils. *Soil Biol. Biochem.* 18, 457–461. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(86\)90053-2](https://doi.org/10.1016/0038-0717(86)90053-2)
 - Cabidoche Y.M., Achard R., Cattani P., Clermont Dauphin C., Massat F., Sansoulet J., 2009. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: a simple leaching model accounts for current residue. *Environmental Pollution*, 157 : p. 1697-1705.
 - Chevallier, T., 1999. Dynamique et déterminants du stockage du carbone dans un vertisol sous prairie (Martinique). ENSAM, Montpellier.
 - Chevallier, T., Fujisaki, K., Rounsard, O., Guidat, F., Kinoshita, R., Melo Viginio Filho, E. de, Lehner, P., Albrecht, A., 2019. Short-range-order minerals as powerful factors explaining deep soil organic carbon stock distribution : the case of a coffee agroforestry plantation on Andosols in Costa Rica. *SOIL* 5, 315–332. <https://doi.org/10.5194/soil-5-315-2019>
 - Chevallier, T., Voltz, M., Blanchart, E., Chotte, J.L., Eschenbrenner, V., Mahieu, M., Albrecht, A., 2000. Spatial and temporal changes of soil C after establishment of a pasture on a long-term cultivated vertisol (Martinique). *Geoderma* 94, 43–58. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00064-6)
 - Chevallier, T., Woignier, T., Toucet, J., Blanchart, E., 2010. Organic carbon stabilization in the fractal pore structure of Andosols. *Geoderma* 159, 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.010>
 - Colmet-Daage, F., Bernard, J., Gautheyrou, J., Gautheyrou, M., Lagache, F., Grécy, J. de, Poumaroux, A., Pallud, A., 1969. Cartes des sols de La Martinique [cartes des sols des Antilles : feuilles nos 1 à 24]. BSA, Pointe à Pitre.
 - Don, A., Schumacher, J., Freibauer, A., 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. *Glob. Change Biol.* 17, 1658–1670. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>
 - Feller, C., Albrecht, A., Blanchart, E., Cabidoche, Y.M., Chevallier, T., Hartmann, C., 2001. Soil organic carbon sequestration in tropical areas. General considerations and analysis of some edaphic determinants for Lesser Antilles soils. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 19–31.
 - Feller, C., Beare, M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79, 69–116. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00039-6)

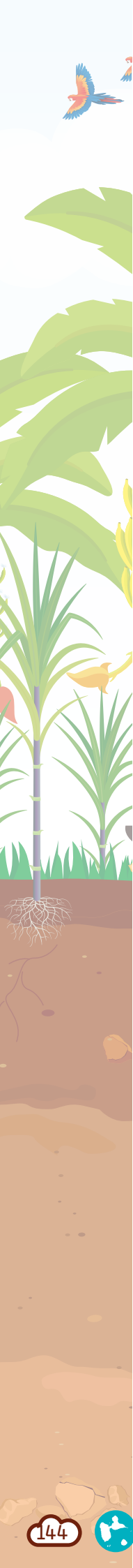


- Feng, W., Plante, A.F., Six, J., 2013. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry* 112, 81–93. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9679-7>
- Ferdinand, M. (2015). De l'usage du chlordécone en Martinique et en Guadeloupe : l'égalité en question. *revue française des affaires sociales*. Revue française des affaires sociales, pages 163–183. <https://www.cairn.info/revue-francaise-des-affaires-sociales-2015-1-page-163.htm>.
- Fujisaki, K., Chapuis-Lardy, L., Albrecht, A., Razafimbelo, T., Chotte, J.-L., Chevallier, T., 2018. Data synthesis of carbon distribution in particle size fractions of tropical soils: Implications for soil carbon storage potential in croplands. *Geoderma* 313, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.010>
- Huygens, D., Boeckx, P., Van Cleemput, O., Oyarzún, C., Godoy, R., 2005. Aggregate and soil organic carbon dynamics in South Chilean Andisols. *Biogeosciences* 2, 159–174. <https://doi.org/10.5194/bg-2-159-2005>
- Mantran, M., Lucien-Brun, M., Angeon, V., 2017. Le zonage agroécologique aux Antilles françaises : un outil de définition du potentiel agricole et d'aide à la décision en matière d'amélioration des choix de production.
- Marzin, J., Fréguin-Gresh, S., Angeon, V., Andrieu, N., Urrutia, V.B., Cerdan, C., 2021. Étude sur les nouveaux modèles agricoles des départements d'Outre-mer. Rapport final. Cirad, AFD. <https://agritrop.cirad.fr/597946/>
- Ndandou, J.-F.N., 1998. Variations du stock organique et des propriétés physiques d'un vertisol sous prairie après la mise en culture maraîchère : effet du mode de travail du sol. ORSTOM, Montpellier.
- Parc Naturel de la Martinique (2018). Label zéro chlordécone. <http://pnr-martinique.com/habiter/label-zero-chlordecone/>
- Quesada, C.A., Paz, C., Oblitas Mendoza, E., Phillips, O.L., Saiz, G., Lloyd, J., 2020. Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. *SOIL* 6, 53–88. <https://doi.org/10.5194/soil-6-53-2020>
- Rasmussen, C., Heckman, K., Wieder, W.R., Keiluweit, M., Lawrence, C.R., Berhe, A.A., Blankinship, J.C., Crow, S.E., Druhan, J.L., Pries, C.E.H., Marin-Spiotta, E., Plante, A.F., Schädel, C., Schimel, J.P., Sierra, C.A., Thompson, A., Wagai, R., 2018. Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content. *Biogeochemistry* 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0424-3>
- Ripoche A. (2004) Influence du mode de gestion des terres sur le stockage du Carbone et les propriétés biologiques du sol sur trois types de sols de la Martinique. Stage réalisé en vue de l'obtention du DAG (Diplôme d'Agronomie Générale) à l'Institut National Agronomique de Paris-Grignon (INA P-G)
- Torny, D. (2010). Gérer une pollution durable. Le cas du chlordécone aux Antilles françaises. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 59(59) :61–71. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01196931>
- Vaughan, E., Matos, M., Ríos, S., Santiago, C., Marín-Spiotta, E., 2019. Clay and climate are poor predictors of regional-scale soil carbon storage in the US Caribbean. *Geoderma* 354, 113841. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.044>
- Venkatapen, C., 2012. Etude des déterminants géographiques et spatialisés des stocks de carbone des sols de La Martinique. Université des Antilles et de la Guyane.

- Zinn, Y.L., Lal, R., Bigham, J.M., Resck, D.V.S., 2007. Edaphic Controls on Soil Organic Carbon Retention in the Brazilian Cerrado: Texture and Mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 1204. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0014>

PARTIE « LA RÉUNION »

- Agreste, 2021. L'occupation du sol entre 1982 et 2018.
- Agreste La Réunion, 2019. Mémento 2019 Agricole et rural.
- Allo, M., 2019. Usages et changements d'usages des sols agricoles : impacts sur les stocks de carbone organique du sol en milieu volcanique tropical. Approche spatiale et bilan des gaz à effet de serre à l'île de La Réunion. Université de Montpellier.
- Allo, M., Albrecht, A., Legier, P., Goge, F., Jameux, M., Thuriès, L., Todoroff, P., 2017. Long-term diachronic series for soil carbon saturation evidence : A case study on volcanic soils of Reunion island under sugarcane crops. [WWW Document]. Abstr. Book Pedometrics 2017. URL <https://agritrop.cirad.fr/586933/> (accessed 4.28.21).
- Allo, M., Todoroff, P., Jameux, M., Stern, M., Paulin, L., Albrecht, A., 2020. Prediction of tropical volcanic soil organic carbon stocks by visible-near- and mid-infrared spectroscopy. *CATENA* 189, 104452. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104452>
- Balesdent, J., Mariotti, A., Guillet, B., 1987. Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biol. Biochem.* 19, 25–30. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90120-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90120-9)
- Bart, F., 2016. Île de la Réunion, quelques enjeux environnementaux contemporains. *Dyn. Environnementales J. Int. Géosciences L'environnement* 120–139. <https://doi.org/10.4000/dynenviron.706>
- BRGM, 2006. Carte géologique de la Réunion à 1/100 000, Editions BRGM. ed.
- Chevallier, T., Woignier, T., Toucet, J., Blanchart, E., 2010. Organic carbon stabilization in the fractal pore structure of Andosols. *Geoderma* 159, 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.010>
- Christina, M., 2021. Impact du changement climatique sur les rendements canniens dans les 50 prochaines années à La Réunion. <https://doi.org/10.18167/DVN1/D2BGDI>
- Christina, M., Jones, M.-R., Versini, A., Mézino, M., Le Mézo, L., Auzoux, S., Soulié, J.C., Poser, C., Gérardaux, E., 2021. Impact of climate variability and extreme rainfall events on sugarcane yield gap in a tropical Island. *Field Crops Res.* 274, 108326. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108326>
- Collinet, M., Feder, F., Soulié, J.-C., 2021. Soil analysis data from Laboratoire d'Analyses Agronomiques of Réunion Island CIRAD. Dataverse UR 78 Recycl. Risque. <https://doi.org/10.18167/DVN1/EAVAGM>
- Dupuy, S., 2018. Carte d'occupation du sol 2017 Spot6-7 (niveau 3) [WWW Document]. URL http://aware.cirad.fr/layers/geonode%3Aclassif_gabir_2017_postclas_code3_cor (accessed 10.21.21).
- Edouard-Rambaut, L. A., Vayssières, J., Versini, A., Salgado, P., Lecomte, P., Tillard, E., 2022. 15-year fertilization increased soil organic carbon stock even in systems reputed to be saturated like permanent grassland on andosols. *Geoderma* 425, 116025
- Feder, F., Bourgeon, G., 2009. Mise à jour de la carte des sols de l'île de la Réunion. Démarche suivie et problèmes rencontrés. *Etude Gest. Sols*.
- Huygens, D., Boeckx, P., Van Cleemput, O., Oyarzún, C., Godoy, R., 2005. Aggregate and soil organic carbon dynamics in South Chilean Andisols. *Biogeosciences* 2, 159–174. <https://doi.org/10.5194/bg-2-159-2005>



- Jamoteau, F., 2018. Contribution du carbone des produits résiduels aux matières organiques des sols de la Réunion. Une approche isotopique. (Rapport de Master 1 Hydrogéologie et transferts). Université de Poitiers.
- Jamoteau, F., Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Tillard, E., Versini, A., 2021. Can stable isotopes quantify soil carbon build-up from organic fertilizers? *Isotopes Environ. Health Stud.* 57, 470–491. <https://doi.org/10.1080/10256016.2021.1946532>
- Jarousseau, H., David, D., DOELSCH, E., Farinet, J.-L., Feder, F., Guerrin, F., Medoc, J.-M., Queste, J., Paillat, J.M., Saint Macary, H., Sallote, B., Thuries, L., Wassenaar, T., 2016. La Réunion : recyclage de PRO en milieu insulaire tropical, in: *Le Recyclage Des Produits Résiduels Organiques. Regards Sur Une Pratique Agro-Écologique*. Editions Quae, p. 276 p.
- Kyulavski, V., Recous, S., Garnier, P., Paillat, J.-M., Thuriès, L., 2019. Application of N Fertilizer to Sugarcane Mulches: Consequences for the Dynamics of Mulch Decomposition and CO₂ and N₂O Fluxes. *BioEnergy Res.* 12, 484–496. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10001-0>
- Kyulavski, V.D., 2019. Émissions de gaz à effet de serre et flux de carbone du sol associés aux mélanges de résidus de récolte et de produits résiduels organiques dans la culture de la canne à sucre. Université de La Réunion.
- Lagabriele, E., Metzger, P., Martignac, C., Lortie, B., Durieux, L., 2007. Les dynamiques d'occupation du sol à la Réunion (1989-2002). M@ppemonde.
- Marzin, J., Fréguin-Gresh, S., Angeon, V., Andrieu, N., Urrutia, V.B., Cerdan, C., 2021. Étude sur les nouveaux modèles agricoles des départements d'Outre-mer. Rapport final. Cirad, AFD.
- Pouzet, D., 2002. Caractérisation chimique des sols réunionnais : regroupement spatial homogène des données. s.n.
- Pouzet, D., Velle, A., Rassaby, A., 2002. Estimation des résidus de récolte de la canne à sucre : bilan des études menées au cours des campagnes sucrières 2000 et 2001 sur l'île de La Réunion [WWW Document]. URL <https://agritrop.cirad.fr/489222/> (accessed 4.28.21).
- Ramos, M., Todoroff, P., Versini, A., Bravin, M., Thuriès, L., Albrecht, A., 2023. Volcanic tropical soils are discriminated by an unsupervised vis-near spectroscopy approach. *Soumis dans Catena*.
- Raunet, M., 1988. Département de la Réunion. Carte morpho-pédologique au 1:50 000 en quatre feuilles. Cirad-Irat et région Réunion.
- Sierra, J., Chopart, J.L., Guindé, L., Blazy, J.M., 2016. Optimization of Biomass and Compost Management to Sustain Soil Organic Matter in Energy Cane Cropping Systems in a Tropical Polluted Soil: a Modelling Study. *BioEnergy Res.* 9, 798–808. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9729-z>
- Thuriès, L., Moussard, G., Gauvin, M., Feder, F., Doelsch, E., Légier, P., 2013. Organic status of tropical soils predicted by near infrared spectroscopy: Réunion Island as a case study, in: *NIR 2013 Proceedings of 16th International Conference on Near Infrared Spectroscopy: Picking up Good Vibrations*. Citeseer, Montpellier, pp. 256–259.
- Todoroff, P., Albrecht, A., Allo, M., Thuries, L., Tillard, E., 2019. C@RUN : séquestration de carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, modélisation et potentiels d'atténuation du changement climatique. CIRAD-IRD.
- Versini, A., Poultney, D., Bachir, H., Février, A., Paillat, J., 2020. Effect of nitrogen fertilisation on sugarcane root development and nitrogen accumulation in ratoon crops of Reunion Island. *Sugar Tech* 22, 1110–1121.

- Viaud, P., 2019. Modélisation de la dynamique de la matière organique des sols en contexte d'apport de produits résiduels organiques à la Réunion (Rapport de stage de Master II). Université de Lorraine.

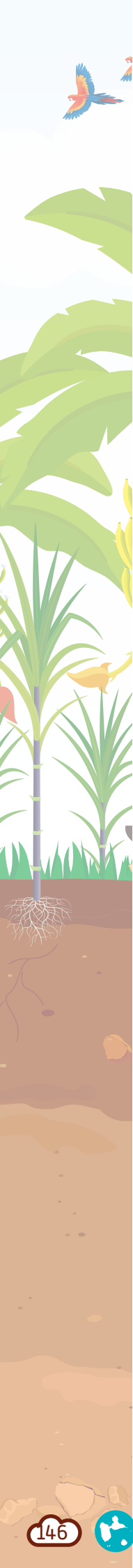
PARTIE « GUYANE »

Bibliographie spécifique au carbone du sol

- Allié, E., Pélissier, R., Engel, J., Petronelli, P., Freycon, V., Deblauwe, V., Soucémariadin, L., Weigel, J., Baraloto, C., 2015. Pervasive Local-Scale Tree-Soil Habitat Association in a Tropical Forest Community. *PLOS ONE* 16.
- Aubertin, C., Cialdella, N., 2016. Articuler la gestion des ressources forestières et du foncier agricole : le projet biomasse-énergie en Guyane. *Sci. Eaux Territ.* Numéro 19, 8–13.
- Beaudou, A., Le Martret H., 2004. MIRURAM/VALSOL : un système d'information et une base de données pour représenter les sols tropicaux et leurs environnements. *Etude et Gestion des Sols*, 11 (3), p. 271-284. ISSN 1252-5861.
- Blanfort V., Assouma M.H., Bois B., Edouard-Rambaut L.A., Vayssières J., Vigne M., 2022. L'efficacité pour rendre compte de la complexité des contributions des systèmes d'élevage au pâturage au changement climatique. In : Ickowicz Alexandre (ed.), Moulin Charles-Henri (ed.). *Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux. Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses*. Versailles : Ed. Quae, p. 86-104. (Matière à débattre et décider).
- Blanfort V., Stahl C., Klumpp K., Falcimagne R., Darsonville O., Fontaine S., Picon-Cochard C., Boval M., Ouliac B., Hérault B., Lecomte P., 2015. Les systèmes herbagers issus de déforestation en Amazonie française (Guyane) : vers la réalisation de bilans de carbone. In : Bourges Bernard (ed.), Gourdon Thomas (ed.). *Broc Jean-Sébastien. Empreinte carbone : évaluer et agir : aperçu pluridisciplinaire des recherches francophones*. Paris : Presses des Mines. p. 55-70. (Développement durable). <http://www.pressesdesmines.com/empreinte-carbone-evaluer-et-agir.htmlVigne>
- Blanfort V., Stahl, C. (eds), 2013. Actes du séminaire « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013.
- Bréchet, L., 2009. Contribution à l'étude de la variabilité spatiale des composantes du bilan de carbone d'un sol de forêt tropicale humide (Paracou, Guyane française) (Thèse de doctorat). Université Henri Poincaré de Nancy.
- Bréchet, L., Le Dantec, V., Ponton, S., Goret, J.-Y., Sayer, E., Bonal, D., Freycon, V., Roy, J., Epron, D., 2017. Short- and Long-term Influence of Litter Quality and Quantity on Simulated Heterotrophic Soil Respiration in a Lowland Tropical Forest. *Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0104-x>
- BRGM, 2011. Inventaire du patrimoine géologique de la Guyane, p10
- Brossard, M., Barthes, B.G., 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. *Journal ?*
- Bruno, G., Jago Jonathan Birk, 2012. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio), *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 82, Pages 39-51, ISSN 0016-7037, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>.



- Chauvel, A., Grimaldi, M., Tessier, D., 1991. Changes in soil pore-space distribution following deforestation and revegetation: An example from the Central Amazon Basin, Brazil. *For. Ecol. Manag., Amazonia: Deforestation and Possible Effects* 38, 259–271. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90147-N](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90147-N)
- Couic, E., Grimaldi, M., Alphonse, V., Balland-Bolou-Bi, C., Livet, A., Giusti-Miller, S., Sarrazin, M., Bousserhine, N., 2018. Mercury behaviour and C, N, and P biogeochemical cycles during ecological restoration processes of old mining sites in French Guiana. *Environ. Sci. Process. Impacts* 20, 657–672. <https://doi.org/10.1039/C8EM00016F>
- Courte, A., 2019. Le carbone des sols, la petite agriculture, ses systèmes de production et pratiques, témoins des enjeux environnementaux et agricoles de la Guyane. Université de Guyane.
- Courte, A., Cialdella, N., Muller, A., Blanford, V., Bochu, J.-L., Brossard, M., 2020. Recenser et évaluer les pratiques agricoles qui stockent le carbone des sols, premier pas vers une agriculture à faible impact en Guyane. *Cah. Agric.* 29, 21. <https://doi.org/10.1051/cagri/2020019>
- Courtois, E.A., Stahl, C., Van den Berge, J., Bréchet, L., Van Langenhove, L., Richter, A., Urbina, I., Soong, J.L., Peñuelas, J., Janssens, I.A., 2018. Spatial Variation of Soil CO₂, CH₄ and N₂O Fluxes Across Topographical Positions in Tropical Forests of the Guiana Shield. *Ecosystems* 21, 1445–1458. <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0232-6>
- Davidson, E.A., De Abreu Sà, T.D., Reis Carvalho, C.J., De Oliveira Figueiredo, R., Kato, M.S.A., Kato, O.R., Ishida, F.Y., 2008. An integrated greenhouse gas assessment of an alternative to slash-and-burn agriculture in eastern Amazonia. *Glob. Change Biol.* 14, 998–1007. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01542.x>
- Demenois, J., Bühler, A., Doucet, J.-L., Federspiel, M., Petrucci, Y., Pelé, V., Sepulchre, F. (2014). Etudes sur le plan pratique de l'aménagement des forêts naturelles de production tropicales africaines – Volet 4 – Gestion durable et préconisations en vue de la certification, ATIBT, 162 p.
- Desprez (2010), Caractérisation morphologique et physico-chimique des sols de neuf placettes forestières du réseau Guyafor
- Dupuits E., Jameux M., Brossard M., 2015, « Rapport Final de Convention MAAF – DGPAAT. Programme régional Inventaire Gestion et Conservation des Sols. Référentiel Régional Pédologique : ROM – Guadeloupe, Guyane, Île de la Réunion ». Synthèses morphopédologique : 171.
- Epron, D., Bosc, A., Bonal, D., Freycon, V., 2006. Spatial Variation of Soil Respiration across a Topographic Gradient in a Tropical Rain Forest in French Guiana. *J. Trop. Ecol.* 22, 565–574. <https://doi.org/10.2307/4092186>
- FAO. 2004. Reduced impact logging in tropical forests: Literature synthesis, analysis and prototype statistical framework. Forest Harvesting; Engineering Programme - Food; Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAO2020GlobalForestResourcesAssessment2020(Rome:FAO) (availableat: <https://doi.org/10.4060/ca8753en>)
- Fanin, N., Hättenschwiler, S., Barantal, S., Schimann, H., Fromin, N., 2011. Does variability in litter quality determine soil microbial respiration in an Amazonian rainforest? *Soil Biol. Biochem.* 43, 1014–1022. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.018>
- Freycon, V., 2016. Appui pédologique au projet CARPAGG. Sols de prairies de Guyane : diagnostic et profils de référence. Calcul du stock de carbone d'un sol. CIRAD-ES.
- Fujisaki, K., Perrin, A.-S., Boussafir, M., Gogo, S., Sarrazin, M., Brossard, M., 2015a. Decomposition kinetics and organic geochemistry of woody debris in a ferralsol in a humid tropical climate. *Eur. J. Soil Sci.* 66, 876–885. <https://doi.org/10.1111/ejss.12277>
- Fujisaki, K., Perrin, A.-S., Desjardins, T., Bernoux, M., Balbino, L.C., Brossard, M., 2015b. From forest to cropland and pasture systems: a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. *Glob. Change Biol.* 21, 2773–2786. <https://doi.org/10.1111/gcb.12906>
- Fujisaki, K., Perrin, A.-S., Garric, B., Balesdent, J., Brossard, M., 2017. Soil organic carbon changes after deforestation and agrosystem establishment in Amazonia : an assessment by diachronic approach. *Agric. Ecosyst. Environ.* 245, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.011>
- GIEC, 2003. Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie
- Guérin, 2006. Émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄) par une retenue de barrage hydroélectrique en zone tropicale (Petit-Saut, Guyane Française) : expérimentation et modélisation
- Guitet, S., Cornu, J.F., Brunaux, O., Betbeder, J., Carozza, J.M., Richard-Hansen, C., 2013. Landform and landscape mapping, French Guiana (South America), *Journal of Maps*, 9:3, 325-335, DOI: 10.1080/17445647.2013.785371
- Guitet, S., Brunaux, O., de Grandville, J.-J., Gonzalez, S., Richard-Hansen, C., 2015a. Catalogue des habitats forestiers de Guyane. Office national des forêts (ONF) et Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement de Guyane (DEAL)
- Guitet, S., 2015b. Diversité des écosystèmes forestiers de Guyane française : distribution, déterminants et conséquences en termes de services écosystémiques. Thèse, Université de Montpellier.
- Guitet, S., Pélissier, R., Brunaux, O., Jaouen, G., Sabatier, D., (2015c), Geomorphological landscape features explain floristic patterns in French Guiana rainforest, 24, 10.1007/s10531-014-0854-8, *Biodiversity and Conservation*
- Guitet, S., Freycon, V., Ferry, B., Brunaux, O., Desprez, M., Le Fol, J., Paget, D., Couteron, P. Geomorphological descriptors at the regional scale provide efficient predictors for soils mapping in tropical forest areas. In Guitet, S., 2015. Diversité des écosystèmes forestiers de Guyane française : distribution, déterminants et conséquences en termes de services écosystémiques. Thèse, Université de Montpellier.
- Guitet, S., Freycon, V., Brunaux, O., Pélissier, R., Sabatier, D., Couteron, P. 2016. Geomorphic control of rain-forest floristic composition in French Guiana: more than a soil filtering effect? *Journal of Tropical Ecology*, 32:22-40
- Guyane Energie Climat, 2016. Les émissions de gaz à effet de serre liées à la forêt en Guyane
- IGN (2015), Indicateurs de gestion durable des forêts ultramarines de Guyane, édition 2015 publiée en 2018
- INRAE, UMR EcoFoG, Solicaz, ONF, 2015. Evaluation de l'impact de l'exploitation forestière à vocation bois énergie sur les services des écosystèmes, Rapport final
- Barret, J. 2001. Atlas illustré de la Guyane. IRD Editions Cayenne, 215p.
- Le Chanoine du Manoir de Juaye, N., 2021. Étude de l'impact d'une plantation d'arbres fixateurs d'azote sur la récupération des fonctions microbiennes et la reconstitution des stocks de carbone du sol après activité minière en Guyane française (rapport de stage). AgroParisTech.



- MAAF, Ecofor, 2018. Indicateurs de gestion durable des forêts françaises ultramarines de Guyane, édition 2015. Version électronique : <http://www.gip-ecofor.org/>
 - Marchand, C., 2017. Soil carbon stocks and burial rates along a mangrove forest chronosequence (French Guiana). For. Ecol. Manag. 384, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.030>
 - OBS, 2019. Atlas des tissus urbains, Identification et description des tissus, p6, Ob-Foncier_4.pdf (audeg.fr)
 - ODEADOM, 2021. La couverture des besoins alimentaires dans les DROM. Observatoire des économies agricoles ultramarines, 14p.
 - ONF, 2013. Guide de Sylviculture
 - ONF, 2017. Occupation du sol en 2015 sur la bande littorale de la Guyane et son évolution entre 2005 et 2015
 - Paget, D., 1999. Étude de la diversité spatiale des écosystèmes forestiers guyanais. Réflexion méthodologique et application. Nancy : ENGREF. 154 p.
 - Parton, W.J., 1996. The CENTURY model, in: NATO ASI SERIES I GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE. pp. 283–294.
 - Pellerin, S., Bamière, L., Launay, C., Martin, R., Schiavo, M., Angers, D., Augusto, L., Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Bellassen, V., 2020. Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? (Rapport scientifique de l'étude). INRA (France).
 - Perrin, A.-S., Fujisaki, K., Petitjean, C., Sarrazin, M., Godet, M., Garric, B., Horth, J.-C., Balbino, L.C., Filho, A.S., de Almeida Machado, P.L.O., Brossard, M., 2014. Conversion of forest to agriculture in Amazonia with the chop-and-mulch method: Does it improve the soil carbon stock? Agric. Ecosyst. Environ. 184, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.009>
 - Robert, M., Antoine, J., Nachtergaele, F. 2002, La séquestration du carbone pour une meilleure gestion des terres. Rome, FAO. Rapport sur les ressources en sols du monde 96 : 57
 - Rossi, J.P., Celini, L., Mora, P., Mathieu, J., Lapied, E., et al., 2010, Decreasing fallow duration in tropical slash-and-burn agriculture alters soil macro-invertebrate diversity: A case study in southern French Guiana. Agriculture, Ecosystems and Environment, Elsevier Masson, 135 (1-2), pp.148–154. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.08.012>
 - Rossi, V., 2014. Guyasim 2011–2014 : un simulateur pour explorer l'impact des scénarios de développement de la Guyane sur les services des écosystèmes forestiers.
 - Schimann, H., Petit-Jean, C., Guitet, S., Reis, T., Domenach, A.M., Roggy, J.-C., 2012. Microbial bioindicators of soil functioning after disturbance: The case of gold mining in tropical rainforests of French Guiana. Ecol. Indic. 20, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.01.021>
 - Schuur, E. A. G., and P. A. Matson (2001), Net primary productivity and nutrient cycling across a mesic to wet precipitation gradient in Hawaiian montane forest, Oecologia, 128, 431–442.
 - SOLICAZ, INRAE, UMR EcoFoG (2015), Guide de la fertilité organique en Guyane
 - Soong, J.L., Maraňon-Jimenez, S., Cotrufo, M.F., Boeckx, P., Bodé, S., Guenet, B., Peñuelas, J., Richter, A., Stahl, C., Verbruggen, E., Janssens, I.A., 2018. Soil microbial CNP and respiration responses to organic matter and nutrient additions: Evidence from a tropical soil incubation. Soil Biol. Biochem. 122, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.04.011>
 - Soong, J.L., Janssens, I.A., Grau, O., Margalef, O., Stahl, C., Van Langenhove, L., Urbina, I., Chave, J., Dourdain, A., Ferry, B., Freycon, V., Herault, B., Sardans, J., Peñuelas, J., Verbruggen, E., 2020. Soil properties explain tree growth and mortality, but not biomass, across phosphorus-depleted tropical forests. Sci. Rep. 10, 2302. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58913-8>
 - Stahl, C., Freycon, V., Fontaine, S., Dezécache, C., Ponchant, L., Picon-Cochard, C., Klumpp, K., Soussana, J.-F., Blanfort, V., 2016. Soil carbon stocks after conversion of Amazonian tropical forest to grazed pasture: importance of deep soil layers. Reg. Environ. Change 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0936-0>
 - Stahl C, Fontaine S, Klumpp K, Picon-Cochard C, Grise MM, Dezécache C, Ponchant L, Freycon V, Blanc L, Bonal D, Burban B, Soussana JF, Blanfort V. Continuous soil carbon storage of old permanent pastures in Amazonia. Glob Chang Biol. 2017 Aug;23(8):3382–3392. doi: 10.1111/gcb.13573. Epub 2016 Dec 14. PMID: 27966250.
 - Turenne, J-F (1982). Evolution de la matière organique en milieu forestier guyanais. Ecosystème Forestier Guyanais : Bulletin de Liaison du Groupe de Travail ECEREX, (6), p. 33–45.
 - Veldkamp, E., Schmidt, M., Powers, J.S., Corre, M.D., 2020. Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics. Nat. Rev. Earth Environ. 1, 590–605. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0091-5>
 - Walcker, R., Gandois, L., Proisy, C., Corenblit, D., Mougin, É., Laplanche, C., Ray, R., Fromard, F., 2018. Control of “blue carbon” storage by mangrove ageing: Evidence from a 66-year chronosequence in French Guiana. Glob. Change Biol. 24, 2325–2338. <https://doi.org/10.1111/gcb.14100>
 - Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützw, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H.-J., Kögel-Knabner, I., 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. Geoderma 333, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- ### Bibliographie spécifique au carbone de la biomasse aérienne
- Aubry-Kientz, M., Rossi, V., Boreux, J.-J., & Héroult, B. (2015a). A joint individual-based model coupling growth and mortality reveals that tree vigor is a key component of tropical forest dynamics. Ecology and Evolution, 5(12), 2457–2465. <https://doi.org/10.1002/ece3.1532>
 - Aubry-Kientz, M., Rossi, V., Wagner, F., & Héroult, B. (2015b). Identifying climatic drivers of tropical forest dynamics. Biogeosciences, 12(19), 5583–5596. <https://doi.org/10.5194/bg-12-5583-2015>
 - Aubry-Kientz, M., Rossi, V., Cornu, G., Wagner, F., & Héroult, B. (2019). Temperature rising would slow down tropical forest dynamic in the Guiana Shield. Scientific Reports, 9(1), 10235. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46597-8>
 - Brien, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo-Mendoza, A., Malhi, Y., Lewis, S. L., Vásquez Martínez, R., Alexiades, M., Álvarez Dávila, E., Alvarez-Loayza, P., Andrade, A., Aragão, L. E. O. C., Araujo-Murakami, A., Arets, E. J. M. M., Arroyo, L., ... Zagt, R. J. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. Nature, 519(7543), 344–348. <https://doi.org/10.1038/nature14283>



- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chave, Jérôme, Davies, S. J., Phillips, O. L., Lewis, S. L., Sist, P., Schepaschenko, D., Armston, J., Baker, T. R., Coomes, D., Disney, M., Duncanson, L., Hérault, B., Labrière, N., Meyer, V., Réjou-Méchain, M., Scipal, K., & Saatchi, S. (2019). Ground Data are Essential for Biomass Remote Sensing Missions. *Surveys in Geophysics*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09528-w>
- Derroire, G., Pioniot, C., Descroix, L., Bedeau, C., Traissac, S., Brunaux, O., Hérault, B. (2021). Prospective carbon balance of the wood sector in a tropical forest territory using a temporally-explicit model. *Forest Ecology and Management*. 497. 119532. [10.1016/j.foreco.2021.119532](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119532).
- Dourdain, A., & Hérault, B. (2015). Allometric equation in the Guiana Shield REDD + for the Guiana Shield (Issue November). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3735.4960>
- FAO (2004) Reduced impact logging in tropical forests: Literature synthesis, analysis and prototype statistical framework. Forest Harvesting: Engineering Programme - Food; Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAO (2020) Evaluation des ressources forestières mondiales 2020, rapport Guyane française.
- Fayad, I., Baghdadi, N., Guitet, S., Bailly, J.-S., Hérault, B., Gond, V., El Hajj, M., & Minh, D. H. T. (2016). Aboveground biomass mapping in French Guiana by combining remote sensing, forest inventories and environmental data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 502–514. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.015>
- Ferry, B., Morneau, F., Bontemps, J.-D., Blanc, L. & Freycon, V. Higher treefall rates on slopes and waterlogged soils result in lower stand biomass and productivity in a tropical rain forest. *J. Ecol.* 98, 106–116 (2010).
- GIEC, 2006. Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur CATF
- Guitet, S., Cornu, J-F., Brunaux, O., Betbeter, J., Carozza, J-M., et al., 2013. Landform and landscape mapping, French Guiana (South America). *Journal of Maps* 9 : 325-335.
- Guitet S., Brunaux O., de Granville J.J., Gonzalez S., Richard-Hansen C., (2015a). Catalogue des habitats forestiers de Guyane. DEAL Guyane. 120p.
- Guitet, S., Pélissier, R., Brunaux O., Jaouen G., Sabatier, D., (2015b). Geomorphological landscape features explain floristic patterns in French Guiana rainforest. *Biodiversity and Conservation*, 24 (5), p. 1215-1237. ISSN 0960-3115.
- Hiltner, U., Huth, A., Bräuning, A., Hérault, B., & Fischer, R. (2018). Simulation of succession in a neotropical forest: High selective logging intensities prolong the recovery times of ecosystem functions. *Forest Ecology and Management*, 430, 517–525. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.042>
- Hiltner Ulrike, Huth Andreas, Hérault Bruno, Holtmann Anne, Bräuning Achim, Fischer Rico. (2021). Climate change alters the ability of neotropical forests to provide timber and sequester carbon. *Forest Ecology and Management*, 492:119166, 11 p. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119166>
- Hubau, W., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Affum-Baffoe, K., Beeckman, H., Cuní-Sanchez, A., Daniels, A. K., Ewango, C. E. N., Fauset, S., Mukinzi, J. M., Sheil, D., Sonké, B., Sullivan, M. J. P., Sunderland, T. C. H., Taedoumg, H., Thomas, S. C., White, L. J. T., Abernethy, K. A., Adu-Bredu, S., ... Zemagho, L. (2020). Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature*, 579(7797), 80–87. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>
- IGN (2015), Indicateurs de gestion durable des forêts ultramarines de Guyane, édition 2015 publiée en 2018
- Molto, Q. (2012). Estimation de la biomasse en forêt tropicale humide : propagation des incertitudes dans la modélisation de la distribution spatiale de la biomasse en Guyane Française [Université des Antilles et de la Guyane]. <http://www.theses.fr/2012AGUY0567>
- ONF (2014), ONF - Guide de sylviculture pour la production de bois d'œuvre des forêts du nord de la Guyane
- Pioniot, C. (2018). Quel futur pour les forêts de production en Amazonie ? Du bilan Carbone de l'exploitation forestière à la recherche de compromis entre services écosystémiques (bois d'œuvre, biodiversité et carbone). Université de Guyane.
- Pioniot, C., Rutishauser, E., Derroire, G., Putz, F. E., Sist, P., West, T. A. P., Descroix, L., Guedes, M. C., Coronado, E. N. H., Kanashiro, M., Mazzei, L., D'Oliveira, M. V. N., Peña-Claros, M., Rodney, K., Ruschel, A. R., De Souza, C. R., Vidal, E., Wortel, V., & Hérault, B. (2019). Optimal strategies for ecosystem services provision in Amazonian production forests. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124090. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5eb1>
- Proisy, C., Couteron, P., & Fromard, F. (2007). Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images. *Remote Sensing of Environment*, 109(3), 379–392. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.009>
- Sullivan, M. J. P., Lewis, S. L., Affum-Baffoe, K., Castilho, C., Costa, F., Sanchez, A. C., Ewango, C. E. N., Hubau, W., Marimon, B., Monteagudo-Mendoza, A., Qie, L., Sonké, B., Martinez, R. V., Baker, T. R., Brien, R. J. W., Feldpausch, T. R., Galbraith, D., Gloor, M., Malhi, Y., ... Phillips, O. L. (2020). Long-term thermal sensitivity of Earth's tropical forests. *Science*, 368(6493), 869–874. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7578>
- Walcker (2015), Dynamique spatiale des mangroves de Guyane entre 1950 et 2014 : forçage atmosphérique et conséquence pour le stock de carbone côtier



Index des figures, des tableaux et des

PARTIE « CONTEXTE, MÉTHODOLOGIE, RÉSULTATS ET RECOMMANDATIONS »

Figure 1 – Le « 4 pour 1000 » en schéma – Protéger et accroître les stocks de carbone organique du sol au niveau mondial pour atténuer et s'adapter au changement climatique, et contribuer à la sécurité alimentaire [adapté de Minasny et al. (2017) et actualisé avec Friedlingstein et al. (2022)]	12
Figure 2 – Les différents processus qui contrôlent le stockage de carbone dans les sols (PRO : produit résiduaire organique ; COD : carbone organique dissout) [d'après Pellerin et al. (2019)]	12
Équation 1 – Principe général du calcul du stock du carbone du sol	13
Figure 3 – Localisation des territoires étudiés et leurs climats. (illustration : Adobe Stock / a7880ss)	14
Tableau 1 – Superficie des différents territoires ultramarins de l'étude	15
Tableau 2 – Présentation des différents comités de suivi de l'étude.	17
La régression logistique binaire	22
Tableau 3 – Déterminants des stocks de carbone du sol à l'échelle des territoires ultramarins.	25
Figure 6 – Stocks de carbone du sol par hectare selon le type de sol dans les territoires ultramarins.	26
Figure 7 – Stocks de carbone du sol par hectare selon les usages des sols	27
Figure 8 – Stocks de carbone du sol par hectare selon l'usage du sol dans les territoires ultramarins.	27
Les stocks de carbone du sol par hectare	27
Tableau 4 – Effets des changements d'usages des sols sur les stocks de carbone du sol des territoires ultramarins.	28
Figure 9 – Variation du stock de carbone des sols en pourcentage de la situation initiale selon le type de changement d'usages du sol dans les territoires ultramarins.	29
Figure 10 – Changement d'usage des sols en Guyane de 1990 à 2012	30
Figure 11 – Variation annuelle du stock de carbone du sol en tonne de carbone par hectare et par an selon le type de culture et de pratiques agricoles dans les territoires ultramarins.	31
Figure 12 – Force prédictive des trois modèles sur l'ensemble du jeu de données réunionnais	32
Tableau 5 – Synthèse de la transposabilité des leviers de réductions des émissions de la méthode du Label « Bas-Carbone »	34
Figure 13 – Occupation du sol dans les départements d'Outre-mer en 2018 sources Agreste – enquêtes Teruti 2017 à 2019	35
Tableau 6 – SAU des différents territoires et usages agricoles des sols. Source : RGA 2020.	35
Figure 14 – SAU et nombres d'exploitations agricoles dans les différents territoires étudiés. Source : RGA 2020.	36
Figure 15 – Principales données économiques sur l'agriculture Outre-mer	37
Figure 16 – Taux d'adoption (en % des exploitations agricoles) des différentes pratiques agricoles. Source : RGA 2020.	38
Figure 17 – Corrélation entre les pratiques étudiées	38
Figure 18 – Synthèse des déterminants de l'adoption de l'agroforesterie	39
Figure 19 – Type de labour en fonction de l'orientation productive de l'exploitation	40

Figure 20 – L'architecture des politiques publiques européennes et nationales d'atténuation du changement climatique et de stockage de carbone	42
Figure 21 – Cartographie des acteurs, des instruments et des politiques publiques d'atténuation du changement climatique et de stockage du carbone à la Guadeloupe	45
Figure 22 – Synthèse des besoins de renforcement de connaissances scientifiques pour contribuer aux recommandations politiques, organisationnelles et socio-économiques & recommandations techniques. et permettre la préservation des stocks élevés de carbone du sol existants et la réduction de leur diminution ailleurs dans les territoires ultramarins	49

PARTIE « GUADELOUPE »

Figure 24 – Carte de l'arc antillais et carte topographique de la Guadeloupe [bogdanserban- stock.adobe.com]	50
Figure 25 – Carte des sols de Grande-Terre et Basse-Terre à la Guadeloupe. Sierra and Desfontaines (2018), adapté de Cabidoche (2000).	51
Tableau 7 – Principales données sur les exploitations agricoles guadeloupéennes.	52
Figure 26 – Usages des sols agricoles en Guadeloupe. Source : RPG 2014	53
Figure 27 – Stocks de carbone organique du sol (COS) selon le type de sol à la Guadeloupe. Source : Base de données TropEmiss & CaribAgro, R. Rochette et Sierra (2015b). Les types de sols présents dans la base de données ont été simplifiés.	55
Figure 28 – Stocks de carbone selon le type de sol et le mode d'usage à la Guadeloupe. D'après Sierra et al. (2015).	56
Figure 29 – Variations simulées des stocks de carbone (SOC) à la Guadeloupe sous l'effet des pratiques (travail du sol et amendement organiques). D'après Chopin et Sierra (2019).	57
Tableau 8 – Variations de stocks de carbone simulées à l'échelle de la Guadeloupe sur la période 2015-2045, avec (With) ou sans (Without) simulation de l'effet du changement climatique (CC). D'après Chopin and Sierra, 2019.	60
Figure 30 – Carte des stocks de carbone en Guadeloupe (couche 0-25 cm), exprimés en tonnes C/ha. Source : BDD TropEmiss & CaribAgro, R. Rochette, D. David et J Sierra et al. (2019).	61
Figure 31 – Usages des surfaces agricoles en Guadeloupe. Source : Recensement Général Agricole 2020.	62
Figure 32 – Orientation productive et spécialisation des exploitations agricoles de Guadeloupe. Source : Recensement Général Agricole 2020.	63
Figure 33 – Taux d'adoption [% des exploitations] des pratiques ayant une influence sur les stocks de carbone des sols agricoles en Guadeloupe. Source : Recensement Général Agricole 2020	63

PARTIE « MARTINIQUE »

Figure 34 – Carte de l'arc antillais et carte topographique de la Martinique [bogdanserban- stock.adobe.com]	68
Figure 35 – Carte des sols de la Martinique, d'après Colmet-Daage et al. (1969) ; numérisation des données par Blanchart et Bernoux (2005)	69
Figure 36 – Evolution de la SAU et de la taille moyenne des exploitations agricoles en Martinique. Source : Mémento de la Statistique Agricole, DAAF972, 2021.	70



équations

Tableau 9 – Usages des sols agricoles en Martinique et évolution entre 2010 et 2020. Source : Recensements généraux agricoles 2010 et 2020..... 71

Tableau 10 – Les effectifs des cheptels en Martinique et évolution entre 2010 et 2020. Source : Recensements généraux agricoles 2010 et 2020..... 71

Tableau 11 – Les surfaces de forêts publiques et privées par type de formation forestière. Source : Mémento de la Statistique Agricole, DAAF972, 2021..... 71

Figure 37 – Distribution des stocks de carbone dans la couche 0-30 cm selon le type de sol à la Martinique. (Blanchart et Bernoux, [2005])..... 73

Figure 38 – Stocks de carbone dans la couche 0-30 cm en fonction de la teneur en argile du sol et selon le type de sol à la Martinique. Source : Blanchart et Bernoux [2005] ; Venkatapen [2012]. 74

Figure 39 – Stocks de carbone selon l'usage et par grand type de sol à la Martinique. Source : Blanchart et Bernoux [2005] ; Venkatapen [2012]. 75

Tableau 12 – Effet des transitions de la forêt vers des cultures pérennes et annuelles sur les stocks de carbone à la Martinique. 76

Tableau 13 – Effet des transitions des prairies vers des cultures annuelles et pérennes sur les variations de stocks de carbone à la Martinique. 77

Tableau 14 – Effet des transitions des cultures pérennes vers des cultures annuelles sur les variations de stocks de carbone à la Martinique. 77

Figure 40 – Carte des stocks de carbone sur la couche 0-30 cm à la Martinique. (Blanchart et Bernoux [2005])..... 78

Tableau 15 – Superficie totale et stocks de carbone totaux par type de sol à la Martinique. (Blanchart et Bernoux [2005])..... 79

Figure 41 – Usages des surfaces agricoles à la Martinique. Source : Recensement Général Agricole 2020..... 81

Figure 42 – Orientation productive et spécialisation des exploitations agricoles de Martinique. Source : Recensement Général Agricole 2020 81

Figure 43 – Taux d'adoption [% des exploitations] des pratiques ayant une influence sur les stocks de carbone des sols agricoles à la Martinique. Source : Recensement Général Agricole 2020 82

PARTIE « LA RÉUNION

Figure 44 – Localisation et carte topographique de La Réunion. (bogdanserban- stock.adobe.com) 88

Figure 45 – Carte géologique de La Réunion. (BRGM [2006], adapté par Allo [2019]) 89

Figure 46 – Cartes de la température moyenne annuelles à La Réunion (a) et de la pluviométrie annuelle (b) (données Météo-France, in Allo [2019])..... 90

Figure 47 – Carte morpho-pédologique simplifiée de La Réunion. (Pouzet [2002], adapté de Raunet [1988]) 91

Figure 48 – Carte d'occupation des sols à La Réunion. (Dupuy, [2018]) 92

Tableau 16 – Usages des sols agricoles à La Réunion et évolution entre 2010 et 2020. Source : Recensements généraux agricoles 2010 et 2020..... 92

Tableau 17 – Les effectifs des cheptels à La Réunion et évolution entre 2010 et 2020. Source : Recensements généraux agricoles 2010 et 2020..... 93

Figure 49 – Evolution de la SAU et de la taille moyenne des exploitations agricoles à La Réunion. Source : Mémento de la Statistique Agricole, DAAF974, 2022..... 93

Figure 50 – Localisation des analyses de sols présentes dans la base de données d'analyses de sols de La Réunion. Les points jaunes figurent les lieux des prélèvements. (Todoroff et al. [2019])..... 94

Figure 51 – Importance relative des déterminants des teneurs en COS du modèle BRT (arbres de régression boostés), sur 7949 échantillons de sols de la base de données d'analyses de sols du Cirad. (Allo [2019])..... 95

Tableau 18 – Correspondance entre unités pédologiques spectrales, abréviations utilisées et minéralogie dominante dans ces sols (Allo [2019])..... 95

Figure 52 – Coefficients de variation des teneurs en COS par type de sol (Allo, 2019) selon les types de sol de la carte morphopédologique de Pouzet [2002] (a) et selon les unités pédologiques spectrales définies par Allo [2019] (b). Les effectifs sont indiqués entre parenthèses (Allo [2019]). 96

Figure 53 – Stocks de COS selon la classe de sol spectral, sur 962 échantillons de la base de données d'analyses de sols du Cirad, cultivés majoritairement en canne à sucre. (Allo [2019])..... 96

Figure 54 – Stocks de COS selon le mode d'usage et le type de sol spectral dans la base de données du Cirad à La Réunion. La minéralogie dominante des types de sol est décrite en Tableau 16. (Allo [2019])..... 97

Figure 55 – Spatialisation des 8742 points de la base de données avec le type de sol spectral associé, et cartographie des unités pédologiques spectrales générées par les polygones de Voronoï. (Allo [2019]) 97

Figure 56 – Carte des unités pédoclimatiques et carte des usages agricoles (Allo, 2019)..... 98

Figure 57 – Carte des stocks de COS (a) et de leur écart-type (b) dans les sols agricoles de La Réunion. (Allo [2019]) 98

Tableau 19 – Quantités de COS totales par groupe de sol et usage agricole. (Allo [2019])..... 99

Figure 58 – Évolution temporelle des teneurs en COS d'îlots de canne à sucre, échantillonnés au moins à 6 reprises entre 1993 et 2017. (Allo [2019]) 99

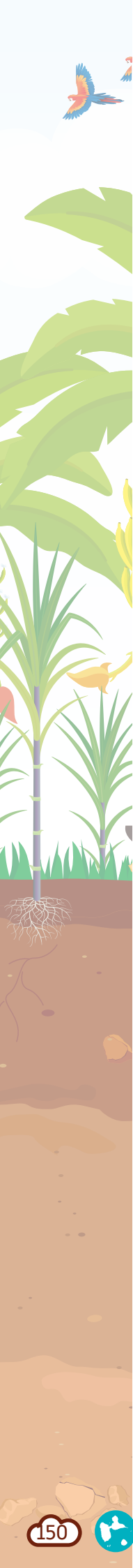
Figure 59 – Différences moyennes de stocks de COS sur 0-30 cm de profondeur entre les cultures de canne et d'autres usages, significativement différentes de zéro, par unité pédoclimatique. (Allo [2019]) 100

Tableau 20 – Caractéristiques des sites d'étude amendés par des produits résiduels organiques (PRO). 101

Figure 60 – Accumulation du carbone issu des amendements organiques dans les sols en fonction des quantités de carbone apportées par ces amendements. (Jamoteau et al., [2021])..... 102

Figure 61 – Différence moyenne des stocks de carbone à trois profondeurs du sol après 15 ans d'apports d'engrais (M1, M2), de fumiers (Ma1, Ma2) et de composts (C1, C2), relativement à un témoin non fertilisé, dans trois sites de prairie de l'île de La Réunion (LYC, SED, SIC). (Edouard-Rambaut et al. [2022]) 102

Figure 62 – Émissions de CO₂ et N₂O jusqu'à 14 jours après application de fertilisants azotés sur des cultures de canne à sucre



Index des figures, des tableaux et des équations *suite*

(Kyulavski et al. (2019)).....	103
Figure 63 – Usages des surfaces agricoles à la Réunion. Source : Recensement Général Agricole 2020	104
Figure 64 – Orientation productive et spécialisation des exploitations agricoles de La Réunion. Chiffres exprimés en nombres d'exploitations. Source : Recensement Général Agricole 2020	105
Figure 65 – Taux d'adoption [% des exploitations] des pratiques ayant une influence sur les stocks de carbone des sols agricoles à La Réunion. Source : Recensement Général Agricole 2020	105
PARTIE « GUYANE »	
Figure 66 – Carte de localisation de la Guyane française carte topographique. (Adobe Stock – lesniewski).	110
Figure 67 – Histogramme de pluviométrie mensuelle sur l'année 2021. Source : Météo France.....	111
Figure 68 – Répartition des types de sols sur le territoire guyanais par Guitet et al. (non publié).....	111
Figure 69 – Carte d'occupation des sols de la côte guyanaise en 2015. Source : Geo.data.gov	112
Figure 70 – Dynamique agricole en Guyane entre 1990 et 2012 (ONF Guyane – IGN 2014 in Guyane Energie Climat 2016).....	113
Figure 71 – Carte de répartition des 33 sites des études de Guitet et al. (2015) et Guitet et al. (2016).....	114
Tableau 21 – Stocks de COS (tC/ha) moyens des différents types de sol à 0-1 m de profondeur (Guitet et al., non publié) et stocks de COS moyens dans l'horizon 0-1 m pour les différents types de sol du littoral. (bases de données CarsGuy, RMQS et Valsol) (Courte (2019))...	115
Figure 72 – Carte de répartition des prélèvements de sol issus des bases de données CarsGuy, RMQS et Valsol (Courte (2019))	115
Figure 73 – Stocks de COS des mangroves du site de Kaw en fonction de leur âge (Marchand et al. (2017))	115
Figure 74 – Stocks de COS (tC/ha) dans l'horizon 0-1m (Guitet et al. (2015)) et carte des types de sol du territoire guyanais en haut à droite (cf. Figure 68) (Guitet et al. (2013))	116
Figure 75 – Stocks de carbone de l'horizon 0-100 cm des unités pédologiques du littoral guyanais (Courte (2019)).....	116
Figure 76 – Stocks de COS à 0-30 cm de profondeur en fonction de la teneur en argile [% clay] sur 12 sites forestiers du dispositif Guyafor (Soong et al. (2020))	117
Figure 77 – Stocks de COS en fonction du stock de carbone aérien (CA) sur 10 sites du dispositif Guyafor (Soong et al., (2020))	117
Figure 78 – Evolution des stocks de COS de 0 à 5 ans après défriche à 0-30 cm de profondeur. (Fujisaki et al. (2017))	118
Figure 82 – Evolution du stock de COS à 0-50 cm de profondeur en fonction du temps dans une parcelle revégétalisée, modélisé par le modèle RothC. (Le Chanoine du Manoir de Juaye (2021)).....	118
Figure 81 – Stocks de COS sous site réhabilité depuis 10 ans (« témoin »), revégétalisé depuis 10 ans (« plantée ») et forestier à 0-1 m de profondeur.....	119
Figure 79 – Schéma théorique de l'évolution des stocks de COS des prairies (en pointillés) et des stocks de carbone de la biomasse et du sol des forêts (en gris) à la suite de la conversion d'une forêt en prairie. (Blanfort et al. (2022))	119
Figure 83 – Teneur en Carbone Organique Dissous (COD) à 0-10 cm sur le site de Saint-Elie (INRAE 2015)	120
Figure 84 – Différence entre stocks de COS forestiers et agricoles en fonction de l'âge de la parcelle. (Courte (2019))	122
Tableau 22 – Résumé des caractéristiques de la typologie des exploitations testées dans Courte (2019) et Courte et al. (2020).....	122
Figure 85 – Modélisation des évolutions du COS dans le temps pour 2 systèmes après apport de Bois Raméal Fragmenté et sous prairie après défriche. (Courte (2019)).....	123
Équation 2 – Calcul de la quantité de carbone en fonction de la biomasse aérienne (GIEC 2006).....	124
Équation 3 – Équations allométriques pantropicales (Chave et al. (2014)).....	124
Figure 86 – Schéma récapitulatif de la méthode employée pour estimer le carbone aérien forestier à l'échelle d'un territoire.	
Figure 87 – Variables de milieux dérivées de données cartographiques et/ou de télédétection : géologie, végétation, topographie, hydrographie, climat, géomorphologie, structure du peuplement.	126
Figure 89 – Carte de distribution de la biomasse vivante aérienne sur le territoire guyanais (Fayad, (2016)).....	127
Figure 88 – Cartographie de biomasse des mangroves du site de Kaw (Proisy et al. (2007)).....	127
Figure 90 – Cartes de distribution de la biomasse forestière et du carbone aérien sur le territoire guyanais selon les paysages géomorphologiques. (Guitet et al. (2013, 2015ab)).....	128
Figure 91 – Evolution des températures annuelles en Guyane depuis 1955 (à gauche) et scénarios de l'évolution des températures jusqu'en 2095).	129
Région de Cacao (crédit photo : Laure Jacob)	129
Figure 92 – Biomasse aérienne forestière en fonction des températures annuelles moyennes et des précipitations annuelles, avec (logged) ou sans (unlogged) exploitation forestière (Hilner et al. (2021)) (base line = climat actuel).....	130
Figure 93 – Changement à long terme des stocks de carbone aérien dû aux seuls effets de la température pour un réchauffement de la température de l'air à la surface du globe de 2°C. (Sullivan et al. (2020)).....	130
Figure 94 – Usages des surfaces agricoles en Guyane. Source : Recensement Général Agricole 2020.....	131
Figure 96 – Taux d'adoption [% des exploitations] des pratiques ayant une influence sur les stocks de carbone des sols agricoles en Guyane. Source : Recensement Général Agricole 2020	132
Figure 95 – Orientation productive et spécialisation des exploitations agricoles de Guyane. Chiffres exprimés en nombres d'exploitations. Source : Recensement Général Agricole 2020	132



Sigles et acronymes

AB	Agriculture Biologique
ADEME	Agence de la Transition Ecologique
AFA	Association Française d'Agroforesterie
AGB	Above-ground biomass (biomasse aérienne)
ALS	Airborne Laser Scanning
AOC	Appellation d'Origine Contrôlée
AOP	Appellation d'Origine Protégée
ASP	Agence de Services et de Paiement
BCAE	Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales
CAG	Chambre d'Agriculture de la Guadeloupe
CASD	Centre d'Accès Sécurisé aux Données
CASDAR	Compte d'Affectation Spécial au Développement Agricole et Rural
CCC	Convention Citoyenne pour le Climat
CDPENAF	Commission Départementale de Protection des Espaces Naturels, Agricoles et Forestiers
CEC	Capacité d'Echange Cationique
CESE	Conseil Economique, Social et Environnemental
Cirad	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNTE	Conseil National de la Transition Ecologique
CNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique
CTCS	Centre Technique de la Canne à Sucre
CUMA	Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole
DAAF	Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt
DEAL	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DM	Dry matter (matière sèche)
EPCI	Etablissement Public de Coopération Intercommunale
ERMG	Exigences Règlementaires en Matière de Gestion
ETA	Entreprise de Travaux Agricoles
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FDSEA	Fédération Nationale Départementale des Syndicats d'Exploitants Agricoles
FEADER	Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural
GDA EcoBio	Groupe de Développement de l'Agriculture Ecologique et Biologique de la Guadeloupe
GES	Gaz à Effet de Serre
GFA	Groupe Foncier Agricole
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
HCC	Haut Conseil pour le Climat
HVE	Haute Valeur Environnementale
IAE	Infrastructure AgroEcologique
ICHN	Indemnité Compensatoire de Handicap Naturel
IGP	Indication Géographique Protégée
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IT2	Institut Technique Tropical
JA	Jeunes Agriculteurs
LBC	Label « bas-carbone »
LEC	Loi Energie Climat
LPG	Les Producteurs de Guadeloupe



Sigles et acronymes *suite*

LTE	Loi relative à la Transition Energétique pour la croissance verte
LULUCF	Land-Use, Land-Use Change and Forestry
MAB / CAB	Maintien de l'Agriculture Biologique / Conversion à l'Agriculture Biologique
MAEC	Mesure Agro-Environnementale et Climatique
MODEF	Mouvement de Défense des Exploitants Familiaux
ODEADOM	Office de Développement de l'Economie Agricole d'Outre-mer
OFB	Office Français de la Biodiversité
ONF	Office National des Forêts
OP	Organisation de Producteurs
OREC	Observatoire Régional de l'Energie et du Climat-Energie
PAC	Politique Agricole Commune
PAT	Projet Alimentaire Territorial
PCAET	Plan Climat Air Energie Territorial
PDRG	Programme de Développement Rural de la Guadeloupe
PLU/RNU	Plan Local d'Urbanisme / Règlement National d'Urbanisme
PNACC	Plan National d'Adaptation au Changement Climatique
PNAN	Programme National pour l'Alimentation
PNDAF	Plan National de Développement de l'Agroforesterie
PNFB	Programme National de la Forêt et du Bois
PNG	Parc National de la Guadeloupe
PNIEC	Plan National Intégré Energie-Climat
POSEI	Programme d'Options Spécifiques à l'Eloignement et à l'Insularité
PPAM	Plantes à Parfum, Aromatiques et Médicinales
PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Energie
PRFB	Programme Régional de la Forêt et du Bois
PSN	Plan Stratégique National
RGA	Recensement Général Agricole
RITA	Réseaux d'Innovation et de Transfert Agricole
RPG	Référentiel Parcellaire Graphique
SAFER	Société d'Aménagement Foncier et d'Etablissement Rural
SAR	Schéma d'Aménagement Régional
SAU	Superficie Agricole Utilisée
SEA	Service de l'Economie Agricole
SICA	Société d'Intérêt Collectif Agricole
SNB	Stratégie Nationale Biodiversité
SNBC / SNBC2	Stratégie Nationale Bas Carbone
SRA-DRA	Directives et Schémas Régionaux d'Aménagement
SRB	Schéma Régional Biomasse
SRB	Schéma Régional Biodiversité
SRCAE	Schéma Régional Climat Air Energie
SRCE	Schéma Régional de Cohérence Ecologique
SRPNB	Schéma Régional du Patrimoine Naturel et de la Biodiversité
STG	Spécialité Traditionnelle Garantie
TLS	Terrestrial Laser Scanning
RUP	Région Ultra-Périphérique de l'Europe
UPG	Union des Producteurs Agricoles de la Guadeloupe



Lexique

Les termes du lexique ont été repris de Pellerin et al. (2019) sauf les termes suivis d'un astérisque.

- **Carbone organique, matières organiques.** Le carbone organique, par définition constituant de molécules où il est lié à l'hydrogène, provient en grande majorité de la matière vivante. Il est l'élément principal des matières organiques. On utilise donc souvent indifféremment les termes « carbone organique » et « matières organiques ». Les laboratoires d'analyse expriment arbitrairement la teneur en matières organiques d'un sol en multipliant sa teneur en carbone organique mesurée (NF/ISO10694) par le coefficient historique 1,724. Alors que la mesure de la teneur en carbone organique est juste, celle des matières organiques est très approximative : les matières organiques des sols contiennent en moyenne 50% de carbone. C'est un chiffre variable : aux extrêmes, la cellulose en contient 45%, et des lipides comme les cires végétales, 85%.

- **Carbone organique dissous*.** Le carbone organique dissous, ou COD, est un paramètre global de la chimie de l'eau utilisé pour caractériser et suivre l'évolution du taux de carbone dissous dans les eaux (douces, saumâtres ou marines), ou la pollution organique des milieux aquatiques. C'est une fraction parfois importante du carbone organique total. Le COD est une valeur quantitative qui regroupe une multitude de composés organiques et des significations physico-chimiques ou écologiques différentes, ayant pour principale origine la décomposition de débris organiques végétaux et animaux faisant partie des écosystèmes naturels (ou anthropisés) des masses d'eau ou d'un cours d'eau. (Source : Wikipedia https://fr.wikipedia.org/wiki/Carbone_organique_dissous)

- **Carbone inorganique.** Le carbone inorganique est présent dans les sols essentiellement sous forme de carbonate de calcium (calcite, CaCO_3), constituant principal du calcaire, parfois de carbonate de magnésium et de calcium (dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Naturellement, il est hérité le plus souvent des roches sédimentaires calcaires ou des coquilles des mollusques comme les escargots. Le carbonate de calcium n'est pas stable dans les sols en dessous d'un pH de 8,3 et tend à se dissoudre et à se décomposer en ions Ca^{2+} , HCO_3^- et en CO_2 . On l'utilise comme amendement dans le chaulage, pour augmenter le pH des sols ou apporter du calcium. Le chaulage, la dissolution ou la précipitation de carbonates peuvent affecter indirectement la dynamique des matières organiques. Ils peuvent localement stocker ou déstocker du carbone, mais participent assez peu au bilan de CO_2 global, car à cette échelle le bilan entre CaCO_3 et CO_2 est d'abord régulé par la libération d'ions calcium à partir de l'altération des roches silicatées.

- **Densité apparente du sol (ou masse volumique sèche).** La densité apparente est la masse de sol sec à 105°C contenue dans un volume donné. Cette donnée est nécessaire pour convertir une teneur en carbone (gC/kg sol) en stock (kgC/m^2 ou tC/ha). On l'exprime en g/cm^3 , t/m^3 ou Mg/m^3 , qui sont synonymes.

- **Fonction de pédotransfert*.** Dans le domaine de la science du sol, les fonctions de pédotransfert (FPT) sont des outils, basés sur des relations statistiques, qui permettent d'estimer et de prédire des propriétés ou des comportements du sol difficiles à mesurer directement et en de nombreux points

(déterminations lourdes et coûteuses), à partir d'autres caractéristiques du sol aisément observables sur le terrain ou déterminées en routine sur échantillons de sols, et de ce fait plus aisément cartographiables. (Source : Les mots de l'agronomie. Histoire et critique, https://lorexplor.istex.fr/mots-agronomie.fr/index.php/Fonction_de_p%C3%A9dotransfert)

- **Minéralisation de la matière organique.** La minéralisation désigne les processus de transformation, dans le sol, de différentes molécules organiques en composés minéraux : principalement CO_2 , NH_4^+ , H_2O , HPO_4^{2-} , SO_4^{2-} . La minéralisation résulte de la respiration et de l'excrétion des organismes du sol. C'est le processus de la destruction des matières organiques. Par extension, on peut définir le flux de minéralisation (ou flux de respiration hétérotrophe) : quantité de carbone organique converti en CO_2 par unité de temps. C'est le processus majeur de sortie du carbone du sol -- les autres postes sont l'érosion et la perte de carbone organique dissout.

- **Nudge*.** Le nudge (« coup de coude » ou « coup de pouce » en français), vise à inciter des individus ou l'ensemble d'un groupe humain à changer tels comportements ou à faire certains choix sans les mettre sous contrainte, obligation ni menace de sanction. (Source : Wikipedia https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_du_nudge)

- **Séquestration.** 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. Stockage et séquestration sont deux notions distinctes : par exemple, épandre un produit résiduaire dans une parcelle donnée correspondra à un stockage de carbone dans cette parcelle, mais pas à une séquestration, par rapport à un épandage qui aurait eu lieu ailleurs.

- **Stock de carbone du sol.** Le stock de carbone est la quantité totale de carbone contenue dans une couche de sol donnée, par unité de surface. On l'exprime en kg/m^2 (kgC/m^2) ou en t/ha (tC/ha). On le calcule généralement en multipliant la concentration massique par la masse de terre fine contenue dans la couche. Cette dernière est le produit de l'épaisseur de la couche, de la proportion massique de terre fine [terre fine / (terre fine + éléments grossiers)] et de la densité apparente du sol. De nombreux inventaires des stocks de carbone font référence à la couche 0-30 cm, ou 0-100 cm.

- **Stockage de carbone.** Le stockage est l'augmentation du stock de carbone dans le temps. Le déstockage (ou stockage négatif) est une diminution.

- **Teneur en carbone du sol (ou concentration en carbone).** La teneur ou concentration en carbone du sol correspond à la proportion massique de l'élément carbone dans le sol sec. On l'exprime en g/kg dans le système international (gC/kg sol), mais parfois aussi en % (gC/100 g sol). Sauf indication contraire, la masse de référence du sol est la masse sèche à 105°C de la terre fine, excluant donc les débris végétaux et les éléments grossiers (graviers et cailloux) de taille supérieure à 2 mm.

