



HAL
open science

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

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

► To cite this version:

Julien Demenois, Alain Albrecht, Vincent Blanfort, Jean- Marc Blazy, Kenji Fujisaki, et al.. Synthèse biophysique sur le stockage de carbone dans les sols en Guyane: 4 pour 1 000 ” Outre-mer : Stocker du carbone dans les sols agricoles et forestiers ultramarins : état des connaissances et synergies avec la Trajectoire 5.0 en Guadeloupe, en Martinique, en Guyane, à La Réunion, à Mayotte, à Saint-Martin et à Saint-Barthélemy. CIRAD; INRAE; IRD. 2023. hal-04130212

HAL Id: hal-04130212

<https://hal.inrae.fr/hal-04130212>

Submitted on 15 Jun 2023

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

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

RAPPORT
FINAL

mars 2023



STOCKER DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICOLES ET FORESTIERS ULTRAMARINS



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

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

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

Consultante technique : Margot Moniot

Relecteur du rapport : Anne Heurtaux (consultante)

Coordination du projet : Julien Demenois

Contacts :

Julien Demenois : julien.demenois@cirad.fr

Alain Albrecht : alain.albrecht@ird.fr

Vincent Blanfort : vincent.blanfort@cirad.fr

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

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

Citation de ce rapport :

MONIOT Margot, FUJISAKI Kenji, FREYCON Vincent, ROGGY Jean-Christophe, , BLANFORT Vincent, DEMENOIS Julien, DERROIRE Géraldine, TESTE Adrien, ALBRECHT Alain, BLAZY Jean Marc, AVADI Angel, BRECHET Laëtitia, BROSSARD Michel, BURBAN Benoit, CHEVALLIER Tiphaine, CHOTTE Jean-Luc, DOREL Marc, FEDER Frédéric, FERNANDES Paula, , RICHARD Antoine, SIERRA Jorge, STAHL Clément, TILLARD Emmanuel, THURIES Laurent, TODOROFF Pierre, VAYSSIERES Jonathan, VERSINI Antoine, VIGNE Mathieu. 2023. Synthèse biophysique sur le stockage de carbone dans les sols en Guyane - version finale – mars 2023 – dans « 4 pour 1 000 » *Outre-mer : Stocker du carbone dans les sols agricoles et forestiers ultramarins : état des connaissances et synergies avec la Trajectoire 5.0 en Guadeloupe, en Martinique, en Guyane, à La Réunion, à Mayotte, à Saint-Martin et à Saint-Barthélemy*. ADEME, Cirad, INRAE, IRD, 65 p.

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

Lancée par la France en 2015 au moment de la Conférence de Paris sur le climat (COP21), l'Initiative 4 pour 1000 offrait une voie dans la lutte contre le réchauffement climatique avec un objectif ambitieux : celui d'augmenter de quatre pour mille, chaque année, le stock de carbone présent dans les sols du monde pour compenser les émissions de CO₂ dues aux activités humaines.

Menée sur le territoire métropolitain en 2019 par l'Institut National de la Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAe) à la demande de l'Agence de la transition écologique (Ademe) et du ministère de l'agriculture et de l'alimentation, l'étude 4 pour 1000 avait comme objectifs d'identifier les pratiques agricoles et sylvicoles engendrant un meilleur stockage de carbone (C) dans les sols et de chiffrer ce stockage additionnel. Elle avait alors montré l'importance du maintien des prairies permanentes, des zones humides ainsi que des forêts, dont les sols ont généralement des stocks de C élevés (Pellerin et al. 2020).

Les sols des territoires ultramarins français présentent également des opportunités en termes de stockage de C. Ils présentent aussi des spécificités en matière de types de sols et de pratiques agricoles et sylvicoles qu'il convenait de prendre en compte. En février 2020, le ministère des outre-mer, le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), INRAe et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) ont ainsi collaboré pour le déploiement de l'Initiative 4 pour 1000 dans ces territoires. Adaptée aux spécificités locales, elle a également eu comme objectif d'identifier les pratiques les plus efficaces en termes de stockage.

L'étude « 4 pour 1000 Outre-mer » a conduit à une première analyse sur l'état des connaissances biophysiques sur le C contenu dans les sols de La Réunion, la Guadeloupe, la Martinique et la Guyane. Des rapports ont été établis pour chacun de ces quatre DROM. Le présent rapport fait état des principaux résultats de la Guyane.

Dans le sol, l'élément C peut être sous deux formes : minérale, contenu dans les roches carbonatées (comme le calcaire), ou organique, contenu dans la matière organique. En Guyane, les roches carbonatées sont très peu présentes. Le carbone du sol a donc été assimilé au Carbone Organique du Sol (COS) et ce sigle a été utilisé tout au long de ce document afin de qualifier le C du sol.

Avec 95 % de sa surface recouverte de forêt et une démographie croissante entraînant une augmentation des besoins en surfaces exploitables, la Guyane présente également de forts enjeux liés au carbone contenu dans la biomasse forestière. A la demande de l'Ademe, le carbone aérien (CA) a également été étudié et est présenté dans un autre rapport.

Après avoir présenté le contexte biophysique de la Guyane, le présent rapport fait état des connaissances acquises à ce jour par la communauté scientifique sur les stocks de COS du territoire. Il présente ensuite les principaux déterminants à leur variabilité spatiale et temporelle. Il expose pour finir l'effet du changement d'usage des sols, des pratiques agricoles et de gestion forestière.

Il a été construit à l'aide de références bibliographiques et d'entretiens réalisés avec différents experts spécialisés dans l'étude des sols. Certains phénomènes indirectement liés aux stocks de COS sont également mis en lumière et leur compréhension est primordiale pour l'évaluation des politiques publiques d'aménagement du territoire. Ils sont détaillés dans une annexe.

Ainsi, les études recensées permettent d'établir que le stock de COS de Guyane est compris entre 612 et 814 millions de tonnes pour des sols allant jusqu'à 1 m de profondeur. Il existe une importante variabilité spatiale, avec des valeurs allant de 50 tC/ha à 140 tC/ha. Cette variabilité est principalement liée à la répartition des principaux types de sols (Ferralsols et Acrisols dans la classification WRB ou World Reference Base for Soil Resources) et plus spécifiquement à la teneur en argile du sol et à l'engorgement en eau. Contrairement à ce que l'on peut observer sur d'autres territoires, la biomasse aérienne et les occupations humaines

anciennes ne sont pas des facteurs de variation spatiale des stocks de COS sur le territoire guyanais.

Il n'existe pas encore de travaux permettant de conclure sur la variabilité temporelle des stocks de COS. Cette variabilité a néanmoins été étudiée à travers l'étude de l'effet des changements d'usage des sols. En Guyane, trois types de changements d'usage ont particulièrement été étudiés : celui de la forêt vers les zones agricoles avec les défriches agricoles, celui de la forêt vers les zones humides avec la mise en eau du barrage de Petit-Saut, et celui de l'occupation humaine vers la forêt avec la revégétalisation des sites miniers.

Si les pertes au moment de la défriche et l'évolution du COS après la défriche sont très variables en fonction des pratiques utilisées (avec ou sans brûlis, défriche mécanisée ou non, etc.), les travaux réalisés dans le cadre du dispositif CARPAGG (CARbone des Pâturages de Guyane et Gaz à effet de serre) ont permis de conclure que les prairies guyanaises issues de la déforestation sont capables de retrouver des stocks semblables aux stocks initiaux au bout de 25 ans.

La mise en eau du barrage de Petit-Saut a entraîné l'immersion de 300 km² de forêt, soit 10 millions de tonnes de C. Cet événement a mené à d'importantes émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) à cause de la dégradation de la matière organique en milieu inondé. A l'heure actuelle, les scientifiques estiment qu'environ la moitié du COS de la retenue a été perdue dans l'atmosphère sous forme d'émissions de CO₂ ou de CH₄, soit 2,1 millions de tonnes de COS perdus.

L'exploitation minière peut entraîner jusqu'à 50 % de pertes de C dans le sol des sites exploités. La revégétalisation a montré ses bénéfices, avec des stocks de COS 40 % plus élevés dans des sites revégétalisés et réhabilités. Les simulations effectuées permettent d'estimer que le COS peut être entièrement régénéré 70 ans après la fin de l'exploitation minière.

Peu d'études réalisées en Guyane permettent de conclure sur l'effet bénéfique individuel des pratiques agricoles et forestières sur les stocks de COS. De manière générale, l'agriculture à « faible impact » permet de maintenir voire d'augmenter les stocks après la déforestation.

En revanche, des travaux ont montré que, indépendamment de son bénéfice indiscutable sur les émissions de GES, la défriche sans brûlis ne permet pas un enrichissement à long terme de C sur les 0-30 premiers centimètres de sol.

L'utilisation de matière organique dans les sols, comme des litières ou du Bois Raméal Fragmenté (BRF), ne permet qu'une augmentation transitoire du COS en raison du *priming effect* qui stimule la respiration microbienne à la suite d'un apport de matière organique fraîche. En revanche, de récents travaux ont montré que certaines litières, comme celles issues de légumineuses, permettent de limiter ce phénomène. Ces résultats sont encore une fois le témoin de l'effet bénéfique de l'utilisation des légumineuses dans l'agriculture pour l'enrichissement naturel en N des sols et leur enrichissement en C à long terme.

Table des matières

Table des matières.....	5
Table des figures	7
Table des tableaux.....	9
Acronymes	10
Lexique.....	10
1. Contexte biophysique de la Guyane	11
1.1. Situation géographique et topographie.....	11
1.2. Climat	12
1.3. Géologie	14
1.4. Géomorphologie	14
1.5. Occupation des sols.....	15
1.5.1. Les forêts.....	17
1.5.2. Les mangroves	19
1.5.3. Les zones agricoles	21
1.5.4. Les zones aurifères.....	22
1.5.5. Les savanes	23
1.6. Changement d'occupation des sols	23
1.7. Typologie des sols	23
2. Quels sont les stocks de carbone du sol ?	25
2.1. Estimation et spatialisation des stocks de COS forestiers par l'ONF	25
2.1.1. Stocks de COS par type de sol	25
2.1.2. Stocks de COS sur l'ensemble du territoire forestier	26
2.2. Estimation et spatialisation des stocks de COS du territoire guyanais par l'IRD	27
2.2.1. Stocks de COS par type de sol	28
2.2.2. Stocks de COS sur le territoire guyanais.....	29
2.2.3. Carte de répartition des stocks de COS sur le littoral guyanais	29
2.3. Variations de stocks de COS sur le territoire guyanais.....	31
2.3.1. En forêt	31
2.3.2. Sur le littoral	32
2.4. Sources d'erreurs liées à l'évaluation des stocks de COS.....	32
2.5. Les stocks de carbone du sol des mangroves.....	32
3. Quels sont les principaux déterminants des stocks de carbone du sol du territoire guyanais ?	35
3.1. Déterminants de la variabilité spatiale des stocks de COS.....	35
3.1.1. La texture	35
3.1.2. L'engorgement en eau	36

3.1.3. Autres variables n'intervenant pas dans la variabilité spatiale des stocks de COS	37
3.2. Variabilité temporelle des stocks de COS guyanais	38
3.3. Le cas des mangroves	38
4. Effets des changements/maintien d'usage des sols sur les stocks de carbone du sol.....	40
4.1. De la forêt vers l'agriculture	40
4.1.1. Résultats du projet CarsGuy	41
4.1.2. Résultats du dispositif CARPAGG.....	41
4.1.3. Conclusion	43
4.2. Des occupations humaines vers la forêt : cas de la revégétalisation de sites miniers	45
4.2.1. Effets de l'activité minière.....	46
4.2.2. Effets de la revégétalisation	46
4.2.3. Effets des espèces végétales plantées	47
4.2.4. Evolution du COS à long terme.....	47
4.3. De la forêt vers les milieux aquatiques : cas du barrage de Petit Saut en Guyane	48
5. Effets des changements/maintien des pratiques agricoles et forestières sur les stocks de carbone du sol.....	49
5.1. Effets des pratiques d'exploitation forestière : cas de la production de bois à des fins énergétiques.....	49
5.1.1. Effets de l'exploitation dirigée et non dirigée : résultats à Risquetout	50
5.1.2. Effets de la coupe rase : résultats à Saint-Elie	51
5.2. Effet des pratiques liées à la défriche agricole	51
5.2.1. La défriche traditionnelle et mécanisée	51
5.2.2. La défriche sans brûlis	52
5.3. Effet des pratiques agricoles.....	53
5.3.1. L'agriculture à faible impact.....	54
5.3.2. L'ajout de litière aérienne.....	56
5.3.3. L'utilisation de plantes fixatrices d'azote.....	57
5.3.4. Le BRF.....	58
5.3.5. Le travail du sol.....	60
Bibliographie	61

Table des figures

Figure 1 : Carte de localisation de la Guyane française (source : Google maps).....	11
Figure 2 : Carte topographique de la Guyane française (IRD, 1979).....	11
Figure 3 : Températures moyennes mensuelles en Guyane sur l'année 2021, exprimées en °C (Météo France)	12
Figure 4 : Histogramme de pluviométrie mensuelle sur l'année 2021 (Météo France).....	12
Figure 5 : Températures moyennes annuelles de 1955 à 2021, exprimées en °C..... (Météo France)	13
Figure 6 : Précipitations annuelles de 1967 à 2021 (Météo France, 2022).....	13
Figure 7 : Carte géologique simplifiée de la Guyane (Fayad, 2016)	14
Figure 8 : Carte de répartition des paysages géomorphologiques (Guitet et al., 2013).....	15
Figure 9 : Carte d'occupation du territoire de la Guyane en 2008 et du Domaine Forestier Permanent de l'ONF (en gris à droite) (source : Geo.data.gov et Rossi, 2014)	16
Figure 10 : Diagrammes de l'occupation des sols en Guyane en 2012 (source : Observatoire du carbone, 2013).....	16
Figure 11 : Carte d'occupation des sols de la côte guyanaise en 2015 (source : Geo.data.gov).....	17
Figure 12 : Carte de répartition des habitats forestiers de Guyane (Guitet et al., 2015a, <i>in</i> ONF, 2015).....	18
Figure 13 : Occupation du sol sur le littoral guyanais en 2015 (ONF, 2017) et photographie d'une mangrove à palétuviers rouges (source : IRD)	20
Figure 14 : Photographies d'une ancienne mangrove (à gauche) et d'une mangrove en installation (à droite) en Guyane (source : C. Proisy)	20
Figure 15 : Photographie aérienne de mangroves guyanaises (source : C. Proisy).....	21
Figure 16 : Dynamique agricole en Guyane entre 1990 et 2012 (ONF Guyane – IGN, 2014, <i>in</i> Guyane Energie Climat, 2016)	21
Figure 17 : Evolution de la SAU totale des exploitations agricoles en Guyane entre 2011 et 2020 (source : DEAAF de Guyane, 2021).....	22
Figure 18 : Localisation des sites miniers guyanais en 2019 (source : DEAL Guyane, 2019)	22
Figure 19 : Changement d'usage des sols en Guyane de 1990 à 2012 (IGN, 2015, d'après Lefèbvre et Verger, 2014)	23
Figure 20 : Répartition des types de sols sur le territoire guyanais par Guitet et al. (non publié).....	24
Figure 21 : Carte de répartition des sites de mesure de stock de carbone (Guitet, 2015)....	25
Figure 22 : Stocks de COS (tC/ha) dans l'horizon 0-1 m (Guitet et al., non publié) et carte des types de sol du territoire guyanais (Guitet et al., 2013).....	26
Figure 23 : Carte de répartition des prélèvements de sol issus des bases de données Carsguy, RMQS et Valsol (Courte, 2019).....	28
Figure 24 : Carte des types de sol du littoral guyanais construite dans le cadre du projet CarsGuy (Courte, 2019).....	30
Figure 25 : Stocks de carbone de l'horizon 0-1 m des unités pédologiques du littoral guyanais (Courte, 2019).....	31
Figure 26 : Epaisseurs du sol des mangroves en fonction de l'âge mesurées à Kaw (Marchand, 2017).....	33

Figure 27 : Localisation des deux sites d'études et schéma en vue aérienne de la répartition des différents types de mangroves sur le site de Sinnamary (Marchand et al., 2017)	33
Figure 28 : Stocks de COS des mangroves du site de Kaw en fonction de l'âge.....	34
(Marchand et al., 2017).....	34
Figure 29 : Stocks de COS à 0-30 cm de profondeur en fonction du pourcentage d'argile sur 12 sites du dispositif Guyafor (Soong et al., 2020)	35
Figure 30 : Réductisol argileux, de fond de talweg. Superposition d'horizons rédoxiques gris et rouille, sur un horizon réductique gris-bleuté à taches rouille, témoignant du caractère permanent, stagnant et oscillant de la nappe (source : Afes)	36
Figure 31 : Stocks de COS en fonction du stock de CA sur 10 sites du dispositif Guyafor (Soong et al., 2020)	37
Figure 32 : Evolution des surfaces occupées par les mangroves en Guyane de 1950 à 2015 (Walcker, 2015).....	39
Figure 33 : Evolution des stocks de COS de 0 à 5 ans après la défriche à 0-30 cm de profondeur (Fujisaki et al., 2017).....	41
Figure 34 : Schéma théorique de l'évolution des stocks de COS des prairies (en pointillés) et des stocks de C de la biomasse et du sol des forêts (en gris) à la suite de la conversion d'une forêt en prairie (V. Blanfort)	43
Figure 35 : Stocks de COS agricoles en fonction des stocks de COS forestiers mesurés chez les 10 agriculteurs (Courte, 2019).....	44
Figure 36 : Photographie d'un site réhabilité (à gauche) et régénéré (à droite) (source : Couic et al., 2018 ; Compagnie minière Espérance)	45
Figure 37 : Stocks de COS sous site réhabilité (« témoin »), régénéré (« plantée ») et forestier à 0-1 m de profondeur (Le Chanoine du Manoir de Juaye, 2021).....	46
Figure 38 : Evolution du stock de COS à 0-50 cm de profondeur en fonction du temps dans une parcelle revégétalisée, modélisée par le modèle RothC	47
Figure 39 : Photographie de troncs submergés qui ne se sont pas décomposés dans la retenue du barrage de Petit-Saut (source : Ademe, Observatoire du Carbone).....	49
Figure 40 : Teneur en Carbone Organique Dissous (COD) à 0-10 cm sur le site de Saint-Elie (INRAe, 2015).....	51
Figure 41 : Photographie d'une défriche traditionnelle (à gauche) et mécanisée (à droite) en Guyane	52
Figure 42 : Différence entre stocks de COS forestiers et agricoles en fonction de l'âge de la parcelle (Courte, 2019)	56
Figure 43 : Flux de C entre les différents compartiments conceptuels de C du sol lors de l'ajout de litières aériennes et racinaires (Derrien et al., 2016)	57
Figure 44 : Photographie de BRF (SOLICAZ, 2015)	58
Figure 45 : Modélisation des évolutions du COS dans le temps pour deux systèmes après apport de Bois Raméal Fragmenté et sous prairie après défriche (Courte, 2019)	59

Table des tableaux

Tableau 1 : Descriptif des différentes familles d'habitats forestiers recensées	19
Tableau 2 : Stocks de COS (tC/ha) moyens des différents types de sol à 0-1 m de profondeur (Guitet et al., non publié).....	25
Tableau 3 : Stocks de COS par hectare et total pour les habitats forestiers de Guyane (MAAF et Ecofor, 2015)	27
Tableau 4 : Stocks de COS moyens dans l'horizon 0-1 m pour les différents types de sol du littoral issus de bases de données de CarsGuy, RMQS et Valsol (Courte, 2019).....	29
Tableau 5 : Stocks de COS et intervalle de confiance évalués pour l'ensemble du territoire guyanais dans l'horizon 0-1 m (Courte, 2019).....	29
Tableau 6 : Stocks de COS à 0-1 m mesurés dans le cadre du projet CARPAGG.....	42
Tableau 7 : Valeur de carbone organique du sol total mesuré à 0-10 cm de profondeur	46
Tableau 8 : Descriptif des parcelles testées sur les deux sites de Risquetout et de Saint-Elie (ONF, 2011 ; INRAe, 2015).....	50
Tableau 9 : Pertes de COS entre les scénarios de défriche avec et sans brûlis à 0-30 cm de profondeur 35 ans après la défriche (Courte, 2019).....	53
Tableau 10 : Résumé des caractéristiques de la typologie des exploitations testées dans Courte, 2019 et Courte et al., 2020	54

Acronymes

BRF : Bois Raméal Fragmenté

COS : Carbone Organique du Sol

EFI : Exploitation à Faible Impact (RIL pour Reduced Impact Logging en anglais)

GIEC : Groupe d'experts International sur l'Evolution du Climat

ONA : Oscillation Nord Atlantique

ONF : Office National des Forêts

PPN : Production Primaire Nette

PPB : Production Primaire Brute

tC : tonne de Carbone

tMS : tonne de Matière Sèche

Lexique

Argile granulométrique : Élément du sol dont la taille est inférieure à 2 μm .

Argile minéralogique : Élément du sol constitué de feuillets de silicates d'alumines.

Densité apparente sol : Masse de sol contenue dans un certain volume.

Fonctions de pédotransfert : Relations statistiques permettant d'estimer une propriété du sol difficile à mesurer à partir d'autres caractéristiques aisément mesurables sur le terrain.

Profil pédologique : Coupe verticale d'un sol permettant d'observer ses différentes couches distinguables par leur couleur, leurs caractéristiques physiques, chimiques, etc.

Exploitation à Faible Impact (RIL pour Reduced Impact Logging en anglais) : Récolte de bois intensivement planifiée et soigneusement contrôlée menée par des travailleurs formés de manière à minimiser les impacts délétères de l'exploitation forestière (FAO, 2004).

1. Contexte biophysique de la Guyane

1.1. Situation géographique et topographie

La Guyane française est un territoire d'environ 83 800 km² situé sur la côte atlantique au nord du continent sud-américain. Elle est entourée par le Suriname à l'ouest et le Brésil au sud et à l'est (Figure 1).

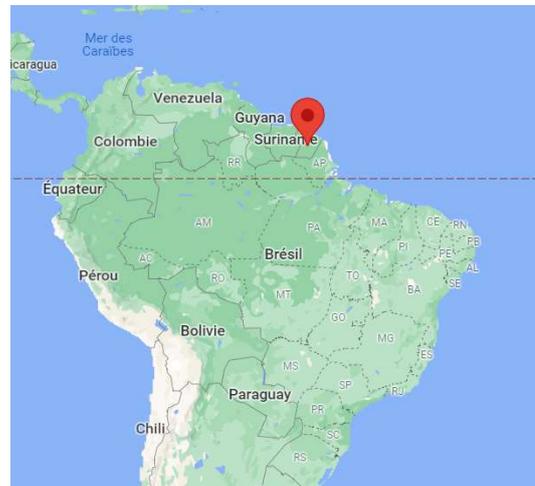


Figure 1 : Carte de localisation de la Guyane française (source : Google maps)

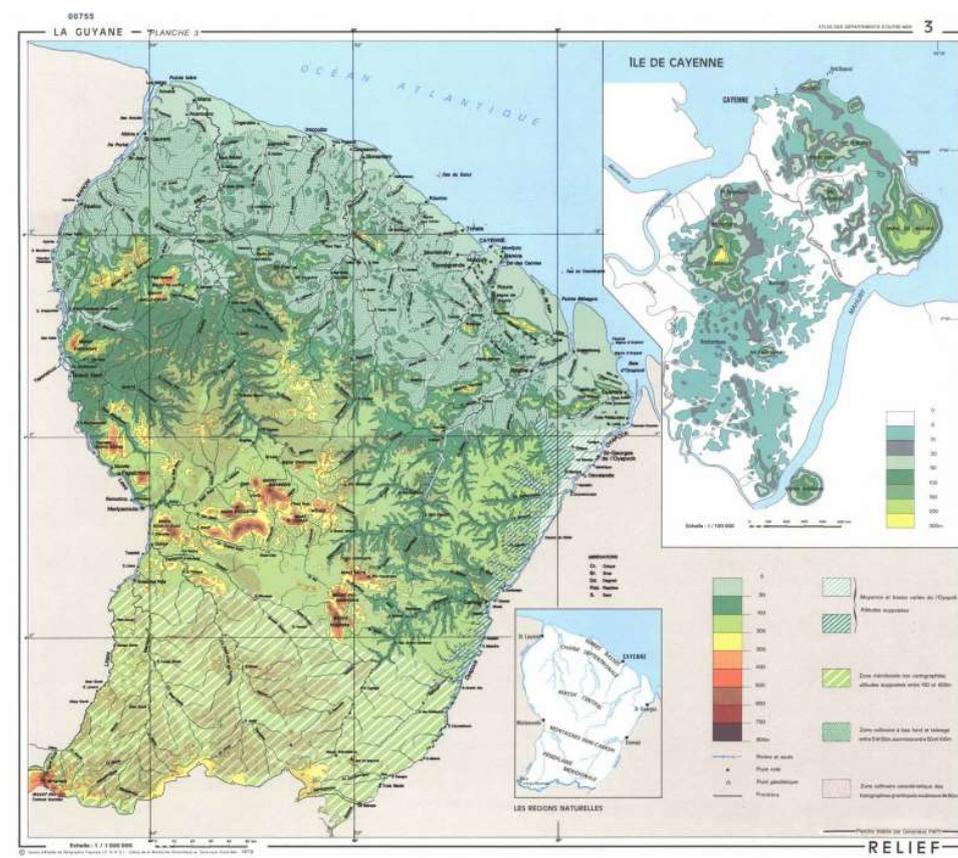


Figure 2 : Carte topographique de la Guyane française (IRD, 1979)

1.2. Climat

Le climat de Guyane est défini comme « tropical humide » et « tropical de mousson » selon la classification de Köppen-Geiger (Peel et al. 2007). Les températures moyennes mensuelles fluctuent peu sur l'année, avec une moyenne annuelle de 27,3°C en 2021 (Figure 3).

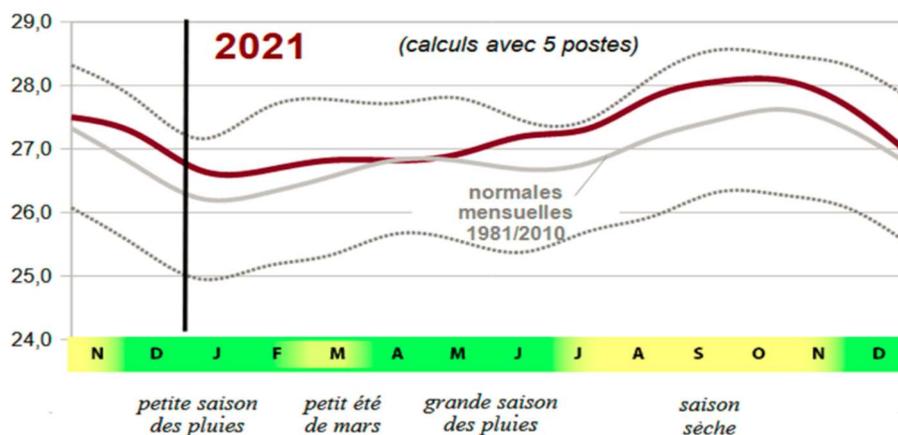


Figure 3 : Températures moyennes mensuelles en Guyane sur l'année 2021, exprimées en °C (Météo France)

Les précipitations varient de 100 à 600 mm/mois. On distingue deux saisons définies en fonction des précipitations. Elles sont par ailleurs régulées par les mouvements de la zone de convergence intertropicale¹. La saison sèche dure d'août à novembre. La saison des pluies dure de décembre à juin. Le mois de mars est marqué par une petite saison sèche que l'on appelle le « petit été de mars » (Figure 4). De manière générale, les précipitations sont plus faibles à l'intérieur des terres que sur la bande côtière. Il existe également un gradient décroissant de précipitations de l'est à l'ouest du littoral (Paget, 1999).

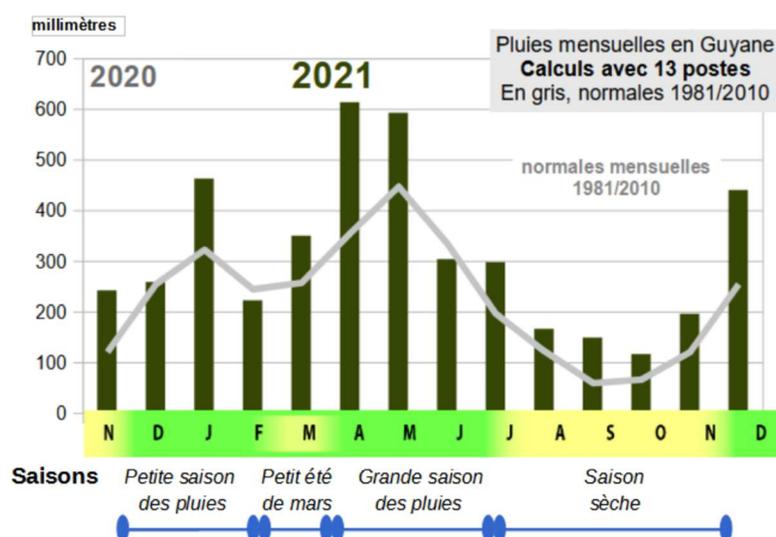


Figure 4 : Histogramme de pluviométrie mensuelle sur l'année 2021 (Météo France)

¹ Zone où les alizées en provenance de l'hémisphère nord et sud se rejoignent.

Depuis 1970, on observe une augmentation des températures moyennes annuelles d'environ 1°C sur le territoire (Figure 5). De manière générale, cette observation est faite sur tout le plateau des Guyanes. L'année 2021 est la 9e année consécutive la plus chaude depuis 1995. Les précipitations annuelles varient de 2500 à 3500 mm selon les années, avec une moyenne de 2 700 mm. En 2021, l'année fut particulièrement arrosée avec presque 4 000 mm de précipitations.

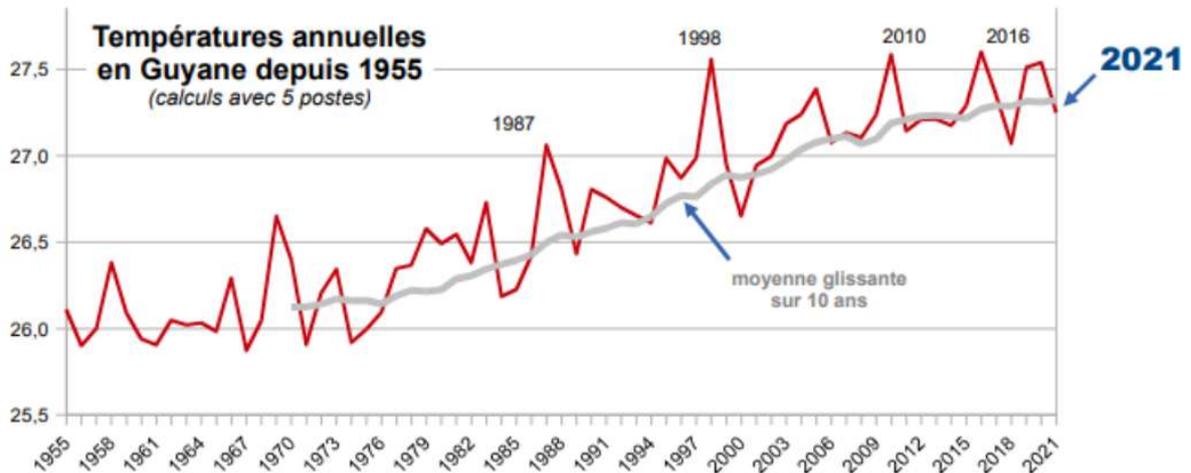


Figure 5 : Températures moyennes annuelles de 1955 à 2021, exprimées en °C (Météo France)

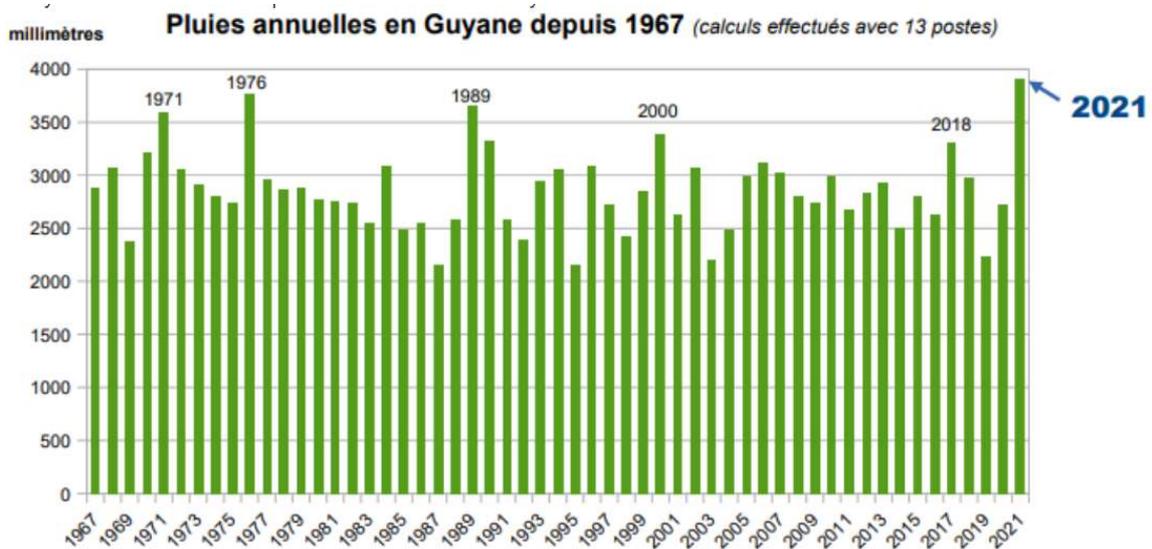


Figure 6 : Précipitations annuelles de 1967 à 2021 (Météo France, 2022)

1.3. Géologie

La Guyane fait partie de la zone géologique du plateau des Guyanes, un ancien massif érodé étendu de la moitié du Venezuela à l'état brésilien de l'Amapa en passant par la Guyane et le Suriname.

Plus de 90 % des roches sont 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. Un enchaînement d'événements géologiques a permis la mise en place des granites et des roches métamorphiques (gneiss sur la Figure 7) lissés par l'action de grandes phases d'érosion à l'origine des roches sédimentaires. Les formations les plus jeunes correspondent aux dépôts alluvionnaires fluvi-marins de la côte (sand and clay sur la Figure 7).

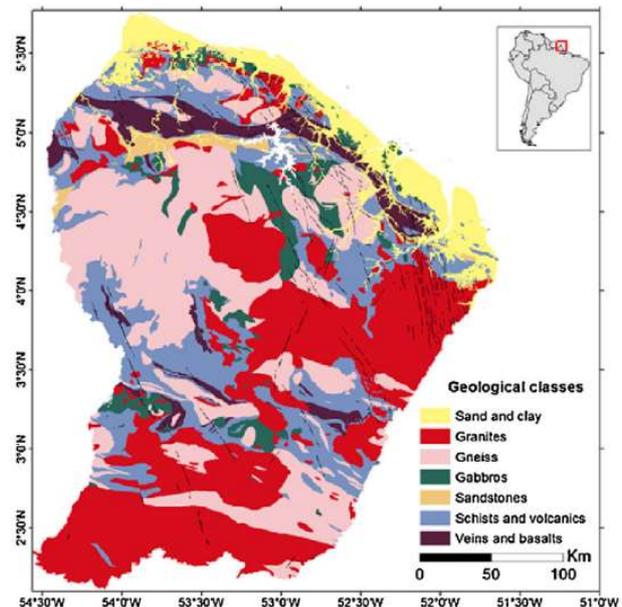


Figure 7 : Carte géologique simplifiée de la Guyane (Fayad, 2016)

1.4. Géomorphologie

La géomorphologie est définie comme l'étude de la forme du relief. Un important travail a permis de caractériser la géomorphologie du territoire (Guitet et al., 2013). Ce travail a notamment été réalisé à partir d'une cartographie mondiale de l'altitude, permettant d'accéder à diverses variables représentatives de la forme du relief (pente, direction de la pente, etc.) en tout point à 30 m d'écart. L'analyse de ces variables par différents experts a permis de définir plusieurs types de paysages géomorphologiques ainsi que leur distribution sur l'ensemble du territoire (Figure 8).

Ainsi, la côte guyanaise est marquée par des paysages de plaines avec quelques reliefs (en bleu). On retrouve dans l'arrière-côte une zone de vallées mêlées à des paysages de reliefs « multi convexes »² (en vert). Le centre du territoire est marqué par les plateaux caractéristiques de la zone géologique du plateau des Guyanes (en orange et jaune), parsemées de zones de montagnes (en rouge) et bordant des reliefs « multi concaves »³ au sud (en violet).

² Correspondent à des collines.

³ Correspondent à des dépressions.

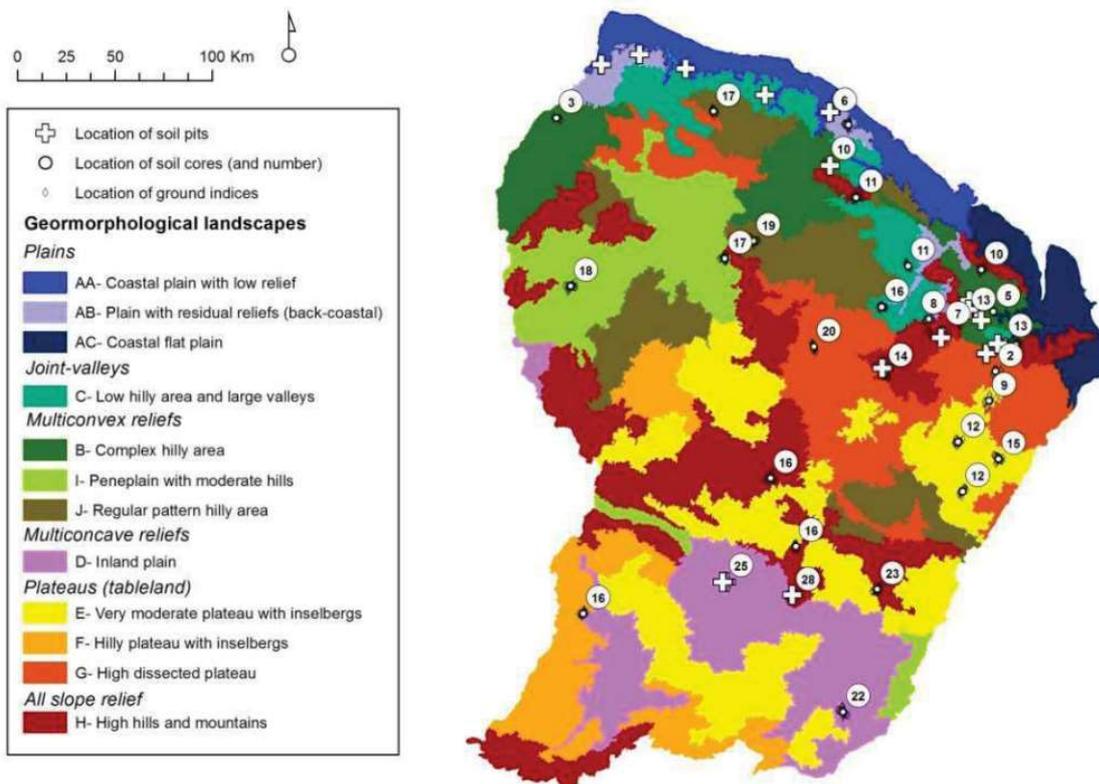


Figure 8 : Carte de répartition des paysages géomorphologiques (Guitet et al., 2013)

Les numéros correspondent aux 33 sites d'étude sur lesquels ont été réalisés des inventaires forestiers et des études de sols, en vue de caractériser les différents habitats forestiers (Guitet et al., 2015a).

1.5. Occupation des sols

La Guyane est un territoire dont la surface est constituée à 95,6 % de forêt représentant 8,1 millions d'hectares dont 2,4 millions gérés par l'Office National des Forêts (ONF). C'est le « Domaine Forestier Permanent » (DFP) (Figure 9), qui accueille notamment les dispositifs expérimentaux consacrés à l'étude de la forêt (sites de Paracou, Guyaflux, Nouragues, etc.).

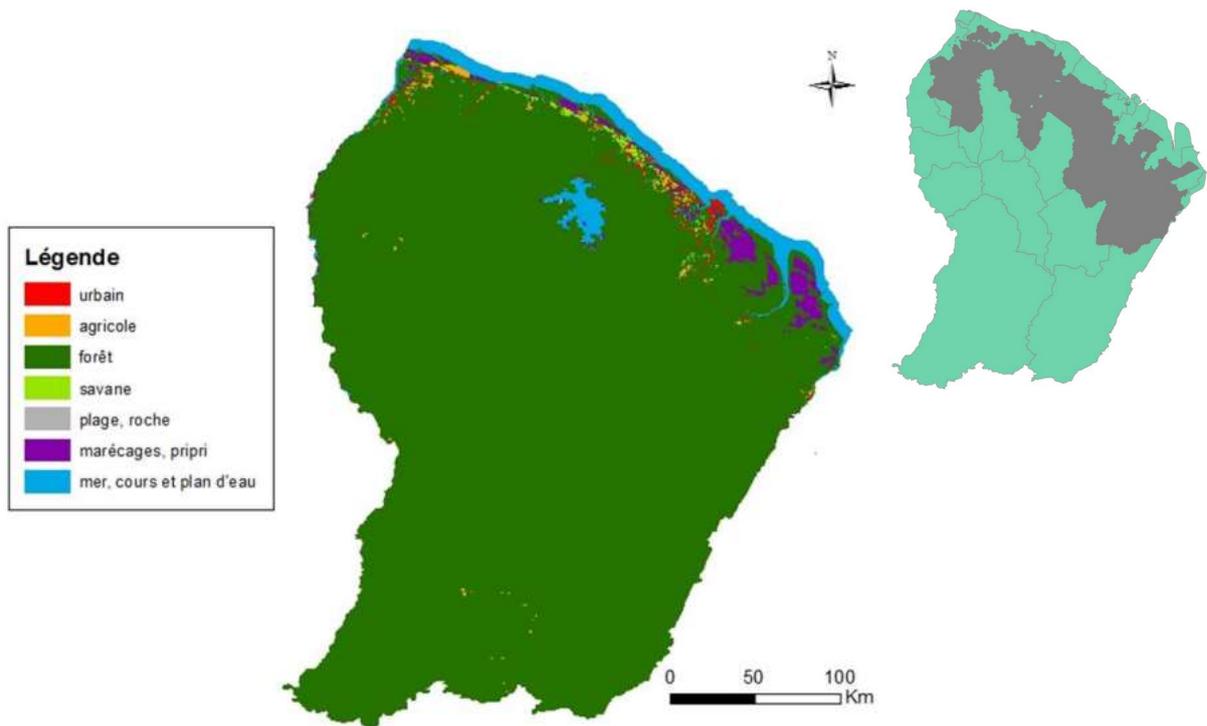


Figure 9 : Carte d'occupation du territoire de la Guyane en 2008 et du Domaine Forestier Permanent de l'ONF (en gris à droite) (source : Geo.data.gov et Rossi, 2014)

Les activités humaines occupent une faible proportion du territoire, moins de 5 %. La mise en eau du barrage de Petit-Saut en 1994 afin de répondre à la demande énergétique d'une population grandissante a mené à l'immersion de 30 000 ha de forêt, représentant aujourd'hui une petite part des surfaces en « zones humides » sur le territoire (Figure 10). Les activités humaines comprenant l'agriculture, l'activité minière et les infrastructures urbaines représentaient seulement 1,4 % des surfaces en 2012, et ce pourcentage a relativement peu augmenté depuis. Hormis les sites miniers, elles se sont principalement développées sur la côte (Figure 11).

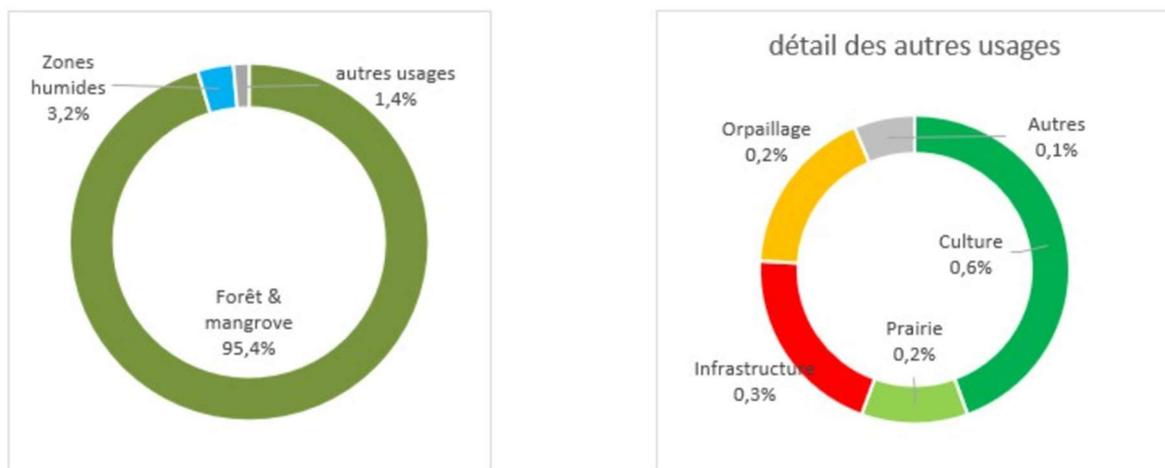


Figure 10 : Diagrammes de l'occupation des sols en Guyane en 2012 (source : Observatoire du carbone, 2013)

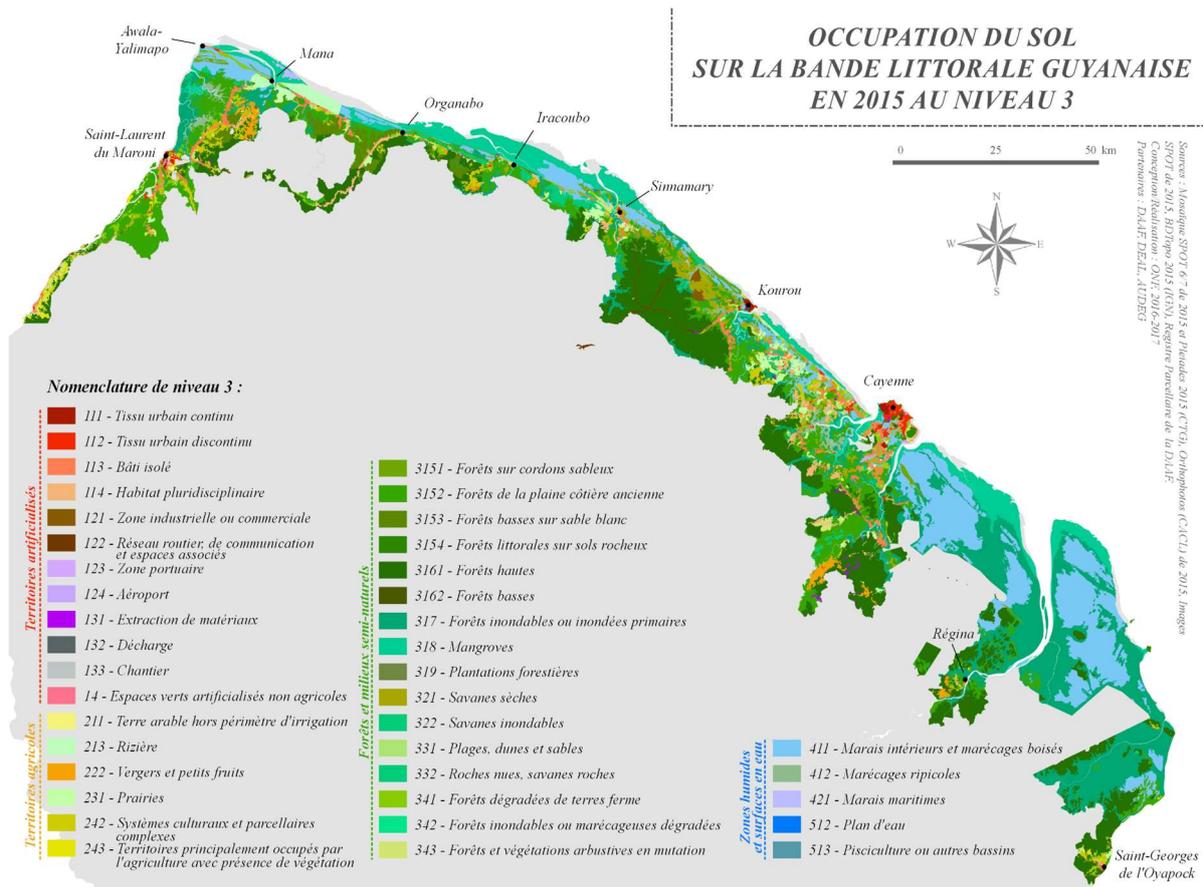


Figure 11 : Carte d'occupation des sols de la côte guyanaise en 2015 (source : Geo.data.gov)

1.5.1. Les forêts

Plus de 95 % du territoire guyanais est recouvert par la forêt amazonienne. Elle est composée de 4 principales familles d'espèces : les Burseraceae, les Mimosoideae, les Caesalpinioideae et les Lecythydaceae (ONF, 2013). En 2015, la définition des paysages géomorphologiques de Guyane (Guitet et al., 2013) ainsi qu'un long travail d'inventaires forestiers ont permis d'aboutir à la création d'une typologie d'habitats forestiers⁴ accompagnée d'une carte de leur répartition sur le territoire. Elle est encore très utilisée par la communauté scientifique et l'ONF dans la compréhension des conditions favorables à l'installation de certaines espèces végétales.

La forêt a ainsi été découpée en 4 grandes familles caractérisées par une biodiversité ainsi qu'un environnement physique particuliers (

Figure 12 ;

⁴ Un habitat est défini par les écologues comme un « ensemble indissociable comprenant un compartiment stationnel, une végétation associée et une faune ayant tout ou une partie de ses activités vitales sur l'espace considéré.

Tableau 1). On retrouve, réparties sur le territoire : les forêts des plaines et dépressions, les forêts des collines, les forêts des plateaux et hauts-reliefs ainsi que les forêts des zones marécageuses (Guitet et al., 2015a).

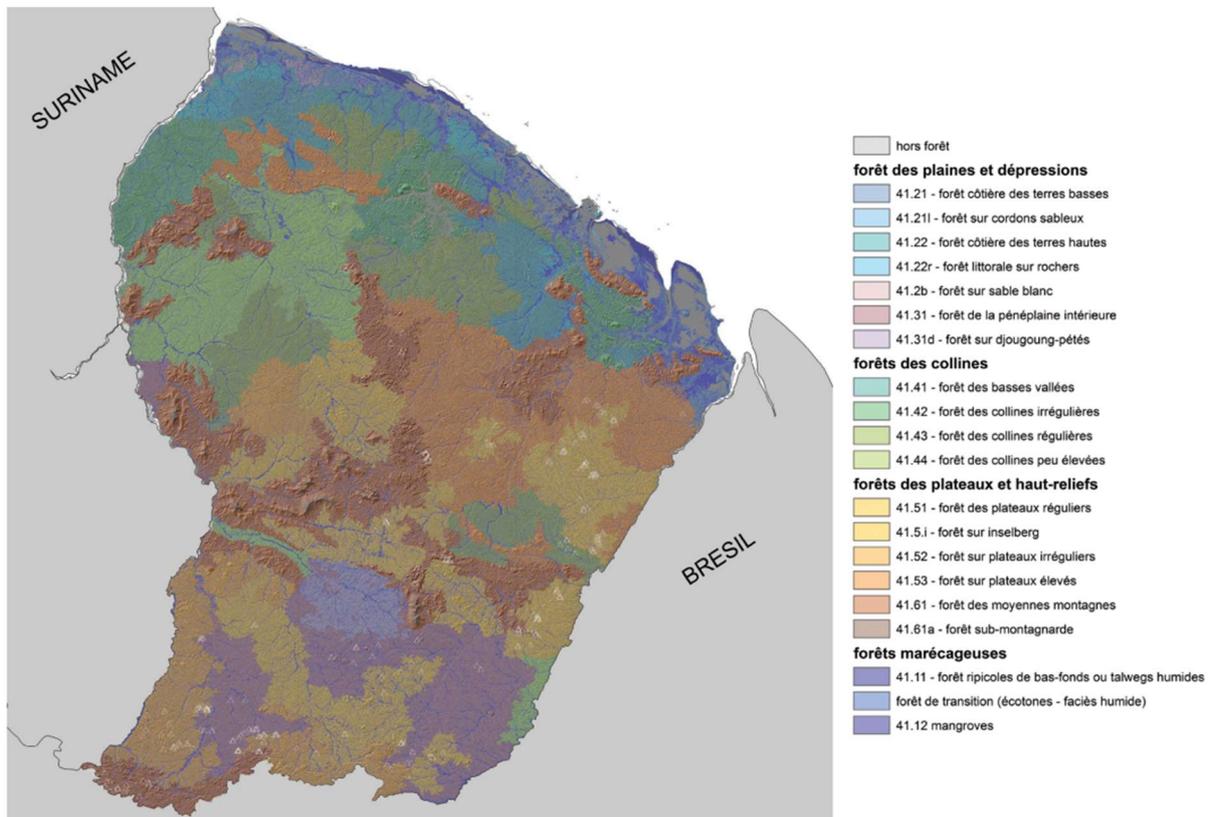


Figure 12 : Carte de répartition des habitats forestiers de Guyane (Guitet et al., 2015a, *in* ONF, 2015)

Familles ou sous-familles	Surface forestière occupée (%)	Type de végétation	Type de sol	Autres caractéristiques
Forêts des plaines côtières	3,8 %	Espèces endémiques (Swartzia bannia sur sable blanc, Astrocaryum vulgare, etc.), espèces hydrophiles (wapa, manil marécage), espèces de sols amincis (maho noir et rouge)	Jeunes, développés sur des dépôts sédimentaires du quaternaire ou sur des sols rajeunis par une érosion récente	Fréquemment perturbées à cause de l'urbanisation
Forêts des dépressions (reliefs multi concaves)	9,5 %	Burseraceae	Généralement amincis, mal drainés et à tendance sableuse (majoritairement Acrisols et Arénosols)	
Forêts des collines (reliefs multiconvexes)	27%	Variations de composition floristique selon l'amplitude des reliefs et la régularité de ces collines	Sols amincis sur les versants des collines (majoritairement les Acrisols), cuirasses démantelées fréquentes	

			sur ces reliefs, sommets de collines aux sols plus profonds et mieux drainés (Ferralsols)	
Forêts des plateaux	33,7 %	Burseraceae, Fabaceae, grands palmiers	Sols plus anciens, profonds et bien drainés (Geric ferralsol)	Les arbres atteignent des tailles plus importantes que dans les autres contextes d'où une biomasse très forte
Forêts des montagnes	17,1 %	Burseraceae, Fabaceae Mimosoideae	Ferralsols	Canopée t très irrégulière à cause des fortes pentes et de la présence de nombreux très gros bois émergents
Forêts marécageuses	8,9 %	Espèces hydrophiles (wapa, manil marécage, moutouchi marécage)	Hydromorphes, parfois inondables (Gleysols, Histosols,...)	Nombreux chablis du fait des sols gorgés d'eau et de leur position de bas de pente (Ferry et al., 2010)

Tableau 1 : Descriptif des différentes familles d'habitats forestiers recensées (Guitet et al., 2015a, in IGN, 2015)

1.5.2. Les mangroves

Les mangroves font partie de la famille des forêts marécageuses selon la classification des habitats forestiers. Il s'agit d'une forêt composée d'espèces d'arbres ou d'arbustes capables de se développer dans les zones de rivages périodiquement submergés. On appelle communément ces arbres les palétuviers (Figure 13). Suivant la salinité de l'eau, on retrouve trois types de palétuviers : les palétuviers gris (*Laguncularia racemosa*), blancs (*Avicenia germinans*) et rouges (*Rhizophora* spp.).

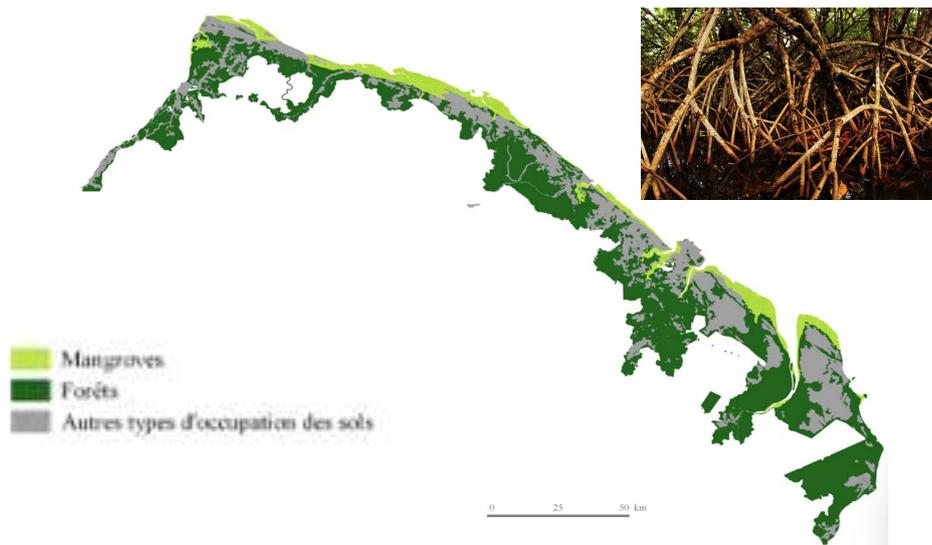


Figure 13 : Occupation du sol sur le littoral guyanais en 2015 (ONF, 2017) et photographie d'une mangrove à palétuviers rouges (source : IRD)

En Guyane, on distingue les « mangroves riveraines », colonisant les rives des fleuves, et les « mangroves côtières ». Ces dernières représentent 90 % du peuplement. On dit qu'elles sont des « forêts mobiles ». En effet, elles s'installent sur les dépôts de vase dont la dynamique d'apparition et de disparition varie au cours du temps avec les phases d'accrétion et d'érosion de la côte. En outre, les surfaces de mangroves au sein du territoire guyanais ne sont pas tout à fait stables dans le temps. A titre indicatif, elles occupaient 56 361 ha en 2014 (Marchand et al., 2017) et 57 660 ha en 2016 (Walcker et al., 2017), soit environ 0,6 % de la surface forestière. Les scientifiques travaillent actuellement à la mise à jour de ces données.



Figure 14 : Photographies d'une ancienne mangrove (à gauche) et d'une mangrove en installation (à droite) en Guyane (source : C. Proisy)

Bien que liées au dépôt et à la remise en suspension des bancs de vase, on observe aussi des mangroves qui se sont installées sur le littoral de façon plus durable, dans des zones relativement calmes et non atteintes par l'érosion depuis un certain nombre d'années. En fonction des phases d'accrétion et d'érosion, on observe ainsi de vieilles mangroves installées vers l'intérieur des terres à côté de jeunes mangroves fraîchement installées sur de nouveaux dépôts côtiers (Figure 15).



Figure 15 : Photographie aérienne de mangroves guyanaises (source : C. Proisy)

1.5.3. Les zones agricoles

En 2020, les exploitations agricoles guyanaises occupaient environ 36 000 ha, soit 4,1 % du territoire. Les quelques 6 135 exploitations agricoles employant 20 600 personnes (Commissariat général au développement durable, 2018) sont essentiellement regroupées sur le littoral (

Figure 16). Elles y produisent de nombreux fruits (ananas, mangues, cupuaçu, açai), des tubercules (manioc, igname) et élèvent majoritairement des bovins, porcs et volailles.

La Surface Agricole Utile (SAU) ne cesse d'augmenter. Entre 2011 et 2020, elle est passée de 24 000 ha environ à 36 400 ha (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les exploitations s'installent principalement sur le littoral, mais aussi à l'intérieur des terres le long de la frontière avec le Suriname pour y créer des zones de cultures ou bien des prairies. Quelle que soit la localisation, l'installation se fait le plus souvent au détriment de la forêt, avec l'utilisation de défriches (abattis brûlés ou non).

Dynamique de création de terres agricoles

- | | |
|----------------------|------------------------|
| ● Entre 2008 et 2012 | ● Entre 2008 et 2012 |
| ● Entre 1990 et 2008 | ● Création de prairies |
| | ● Création de cultures |
| | ● Entre 1990 et 2008 |
| | ● Création de prairies |
| | ● Création de cultures |

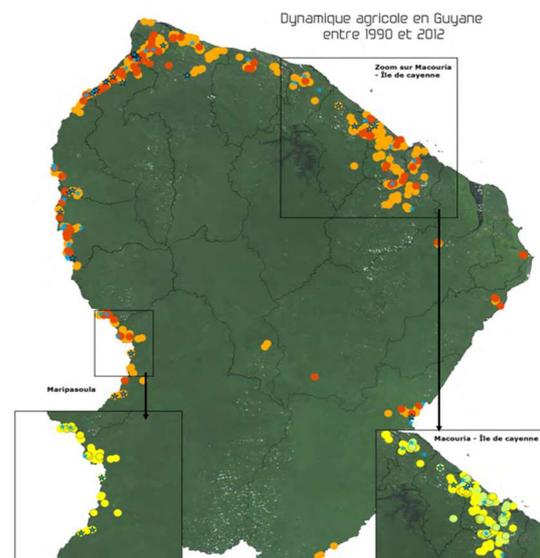


Figure 16 : Dynamique agricole en Guyane entre 1990 et 2012 (ONF Guyane – IGN, 2014, *in* Guyane Energie Climat, 2016)

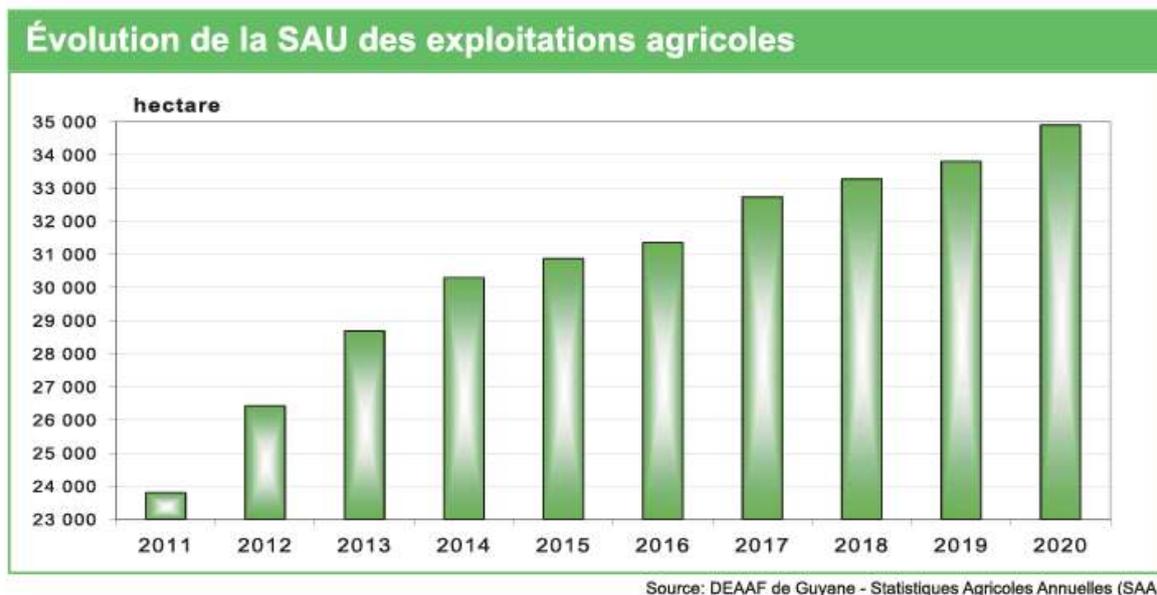


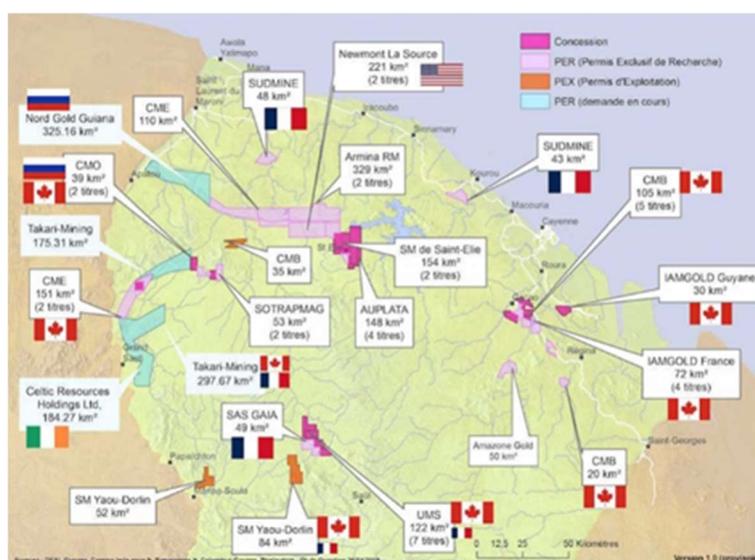
Figure 17 : Evolution de la SAU totale des exploitations agricoles en Guyane entre 2011 et 2020 (source : DEAAF de Guyane, 2021)

1.5.4. Les zones aurifères

Les sols de Guyane, riches en minerais et particulièrement en or, sont exploités depuis la moitié du 19e siècle. L'exploitation aurifère s'est notamment développée à partir des années 1990 à la suite de la publication par le Bureau des Recherches Géologiques et Minières (BRGM) d'une carte des potentialités minières en Guyane française.

Aujourd'hui, la Guyane accueille une vingtaine de mines légales (Figure 17). L'installation des mines s'est faite au détriment de la forêt, au niveau de la zone d'exploitation elle-même 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 (ONF, 2015 ; Rahm et al., 2015 ; Lefèbre et Verger, 2014 in IGN 2015).

Figure 17 : Localisation des sites miniers guyanais en 2019 (source : DEAL Guyane, 2019)



1.5.5. Les savanes

Les savanes sont principalement présentes sur le littoral. Elles occupent 260 km² soit 0,3 % du territoire. Ces formations végétales herbacées typiques des régions tropicales accueillent 16 % de la flore du territoire. Cette flore a été particulièrement étudiée lors du programme européen Life BIODIV'OM, qui visait notamment à assurer la lutte contre deux espèces végétales envahissantes des savanes, *Acacia mangium* et *Melaleuca quinquenervia*.

1.6. Changement d'occupation des sols

Avec 26 % de croissance démographique depuis 2010 d'après l'INSEE, la Guyane est un territoire en développement, et les enjeux d'extension des activités économiques sont forts. Or, avec une surface recouverte à 95 % de forêt, l'extension des activités humaines se fait au détriment de cet écosystème⁵.

La mise en eau du barrage de Petit-Saut en 1994 a entraîné la conversion de 30 000 ha de forêt en zones humides. Même en étant amortie sur 22 ans, elle représentait encore une importante part des changements d'usage des sols annuels entre 1990 et 2012. Aujourd'hui, l'extension de l'agriculture est la première cause de changement d'usage des sols en Guyane (IGN, 2015).

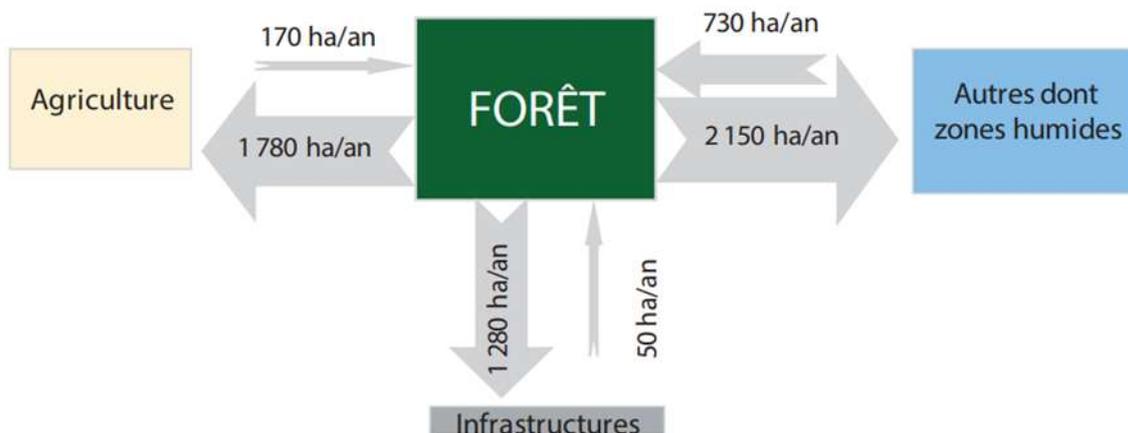


Figure 18 : Changement d'usage des sols en Guyane de 1990 à 2012 (IGN, 2015, d'après Lefèbvre et Verger, 2014)

NB : La conversion zones humides/forêt concerne l'installation des mangroves. La disparition de celles-ci entre dans la catégorie conversion forêt/zones humides.

1.7. Typologie des sols

La Guyane a fait l'objet de l'élaboration de plusieurs cartes de répartition des types de sols sur son territoire. Après avoir montré que les paysages géomorphologiques permettaient de prédire au mieux la distribution des types de sols (parmi l'altitude régionale, les précipitations

⁵ A l'échelle de la surface forestière, ce phénomène s'observe encore peu cependant. En effet, entre 1990 et 2015, la forêt guyanaise a perdu seulement 1 % de sa surface (IGN, 2015).

annuelles, la géologie, ainsi que d'autres variables), Guitet et al. (non publié) ont proposé une carte de répartition des types de sol sur le territoire forestier guyanais. Les types de sols ont été déterminés sur 33 sites représentatifs de toutes les positions topographiques et géologiques du territoire selon le système de classification international WRB (World Reference Base for Soil Resources).

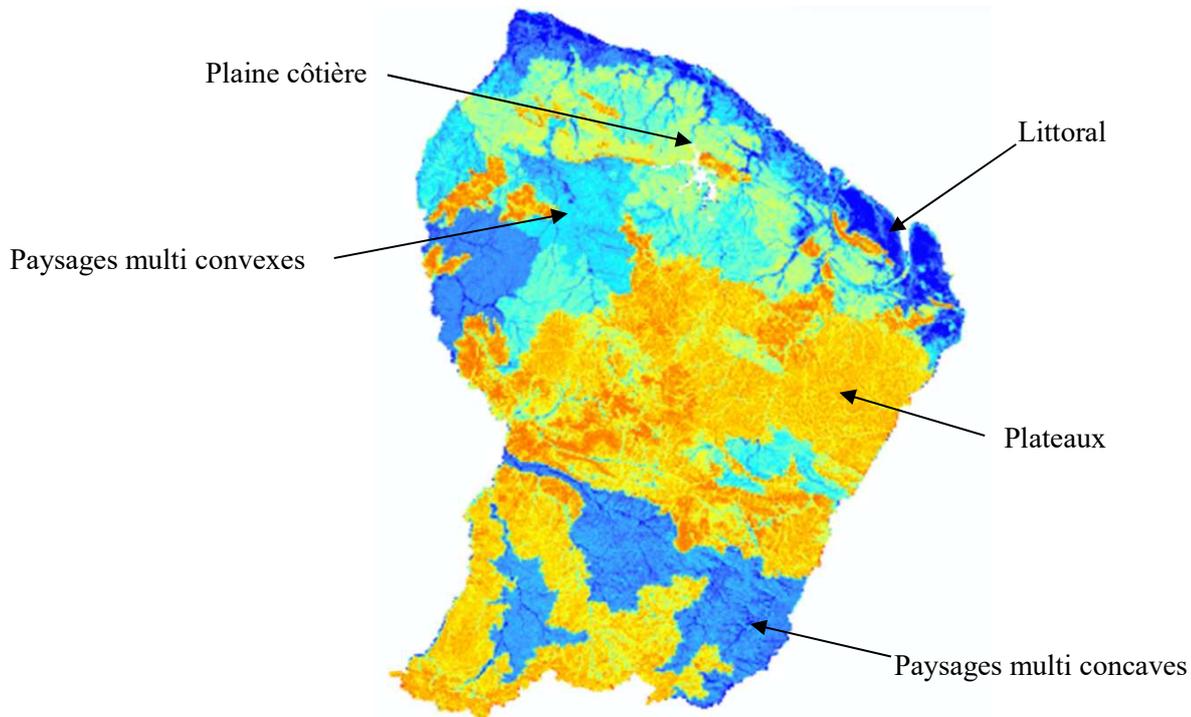


Figure 19 : Répartition des types de sols sur le territoire guyanais par Guitet et al. (non publié)

(orange = GERIC FERRALSOL ; rouge = AUTRE FERRALSOL ; vert = ACRISOL ; bleu = AUTRE)

On observe ainsi en Guyane une dominance des Ferralsols, sols 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 avec un appauvrissement en argiles issu d'une modification du régime hydrique.

Le littoral bénéficie d'un apport de sédiments très important des fleuves guyanais et de l'Amazone. C'est l'un des littoraux les plus dynamiques du monde. Avec les vallées, il présente une diversité des sols (Cambisol et Plinthosol, avec le Ferralsol, l'Acrisol et des Gleysols plus fréquents). Les reliefs multi concaves du sud présentent également une diversité, avec des Acrisols dominants aux plus hautes altitudes, et ailleurs une combinaison de Cambisols, Plintosols, Ferralsols, Acrisols et Gleysols.

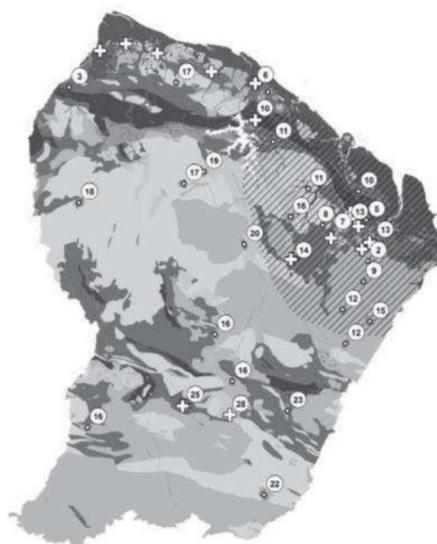
2. Quels sont les stocks de carbone du sol ?

En Guyane, deux travaux font état de référence pour l'évaluation et la spatialisation des stocks de COS : celui de Guitet (2015⁶), soutenu par l'ONF, et celui de Courte (2019), élaboré dans le cadre du projet CarsGuy et soutenu par l'IRD.

2.1. Estimation et spatialisation des stocks de COS forestiers par l'ONF

2.1.1. Stocks de COS par type de sol

Dans le cadre de sa thèse sur l'évaluation de la diversité des écosystèmes forestiers de Guyane, S. Guitet a proposé une méthode d'évaluation des stocks de COS (Guitet, 2015). Sur les 33 sites répartis sur le territoire (), l'auteur a réalisé 421 sondages tarières sous forêts. Ils ont été décrits (profondeur, texture, couleur, éléments grossiers, etc.), puis classés en 6 classes selon leurs similitudes. Pour chaque classe, 12 échantillons composites résultant d'un mélange de 2 ou 3 sondages ont été analysés en laboratoire et leurs stocks de carbone mesurés. Pour l'évaluation de la densité apparente des sols, des fonctions de pédotransferts ont été utilisées.



n7

Figure 21 : Carte de répartition des sites de mesure de stock de carbone (Guitet, 2015)

La description et les résultats d'analyses de ces 12 échantillons composites ont permis d'associer ceux-ci à un type de sol défini selon la classification internationale WRB. Aussi des mesures de COS ont-elles été réalisées sur 25 profils répartis parmi les 33 sites de mesure. Finalement, les stocks de COS mesurés sur les 12 échantillons composites et les 25 profils ainsi que l'évaluation de leur typologie a permis de calculer le stock de COS moyen pour chaque type de sol à 0-1 m de profondeur :

Acrisols	81 tC/ha (+/- 12 %)
Geric Ferralsol	128 tC/ha (+/- 24 %)
Haplic Ferralsol	127 tC/ha (+/- 23 %)
Autres types de sol	71 tC/ha (+/- 31 %)

Tableau 2 : Stocks de COS (tC/ha) moyens des différents types de sol à 0-1 m de profondeur (Guitet et al., non publié)

⁶ Une partie des travaux n'a pas encore été publiée. Ils sont présents dans la thèse.

2.1.2. Stocks de COS sur l'ensemble du territoire forestier

L'extrapolation des mesures de stocks de COS sur les 33 sites grâce à la carte de répartition des types de sols construite dans le cadre de précédents travaux (Guitet et al., 2013) a permis d'aboutir à la carte de répartition du COS forestier (Figure 20). Elle constitue aujourd'hui la carte de référence utilisée par l'ONF.

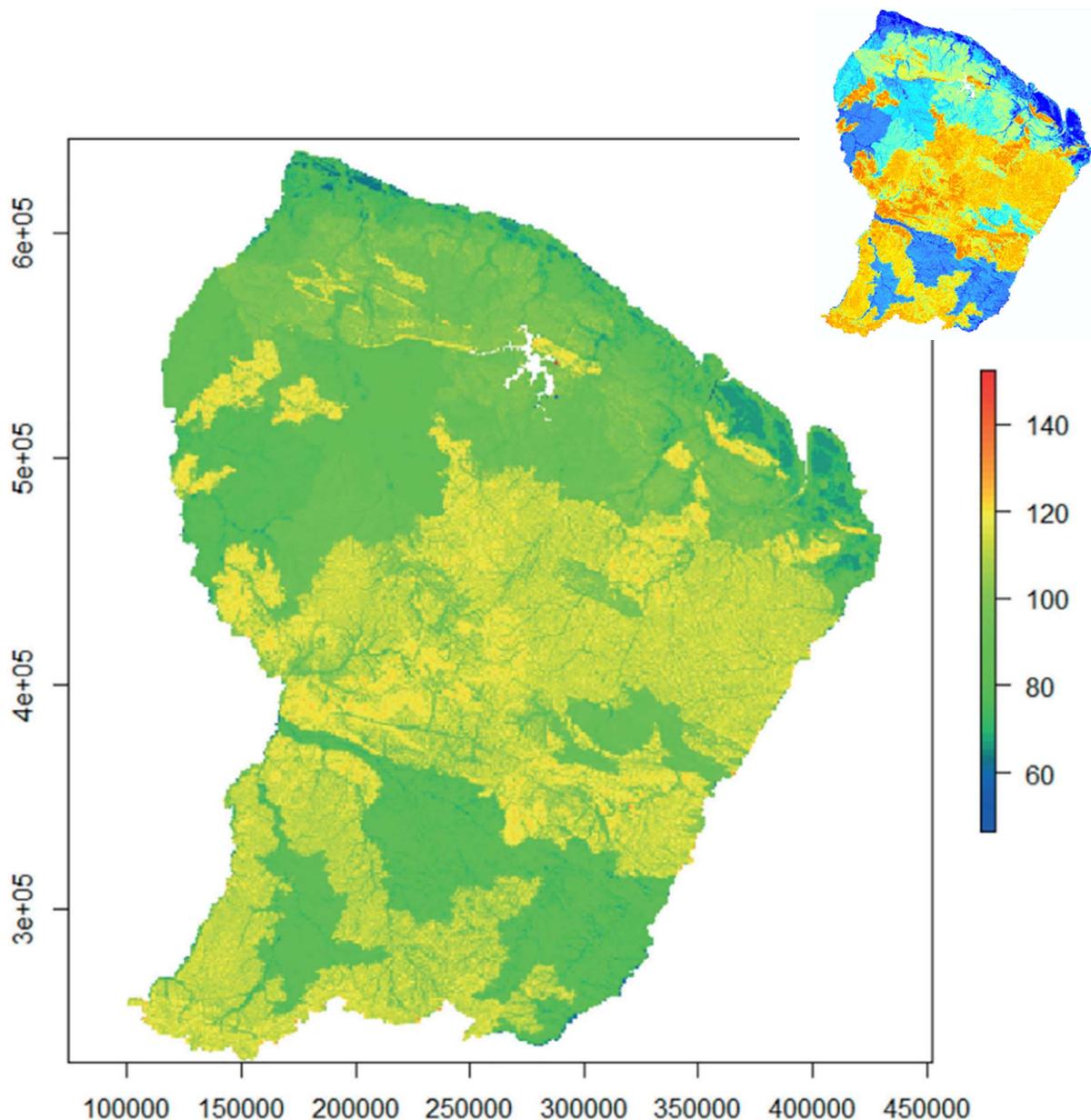


Figure 20 : Stocks de COS (tC/ha) dans l'horizon 0-1 m (Guitet et al., non publié) et carte des types de sol du territoire guyanais (Guitet et al., 2013)

(orange = GERIC FERRALSOL ; rouge = AUTRE FERRASOL ; vert = ACRISOL ; bleu = AUTRE)

Finalement, l'utilisation de la carte de répartition des habitats forestiers (Guitet et al. 2015a) liée à la carte des paysages géomorphologiques (Guitet et al., 2013) et à celle des types de sols a permis de déduire les stocks de COS sur l'ensemble du territoire forestier guyanais (MAAF and Ecofor, 2015) . Ils sont ainsi évalués à 814 millions de tC (Tableau 3).

Types d'habitat	Surface (1000 ha)	Stock moyen (tC/ha)	Stock total (10 ⁶ tC)
Forêts marécageuses	720	91	65
Forêts des plaines côtières	306	81	25
Forêts des reliefs multi-concaves	774	81	63
Forêts des reliefs multiconvexes et vallées jointives	2 204	91	201
Forêts des plateaux	2 736	110	301
Forêts des montagnes	1 390	114	159
Total	8 130		814

Tableau 3 : Stocks de COS par hectare et total pour les habitats forestiers de Guyane (MAAF et Ecofor, 2015)

2.2. Estimation et spatialisation des stocks de COS du territoire guyanais par l'IRD

Dans le cadre du projet CarsGuy (Cadre 1), une estimation des stocks de COS à l'échelle du territoire a également été proposée. Aussi, une carte de répartition des stocks sur le littoral guyanais (incluant les zones agricoles, forestières, artificialisées et humides) a été construite (Courte, 2019 ; Brossard et al., 2018).

Cadre 1 : Le projet CarsGuy, le RMQS et la base de données Valsol

Le projet CarsGuy (Carbone des sols de Guyane) est un projet qui s'est déroulé entre 2015 et 2018. Mené par l'IRD en collaboration avec l'Ademe, Terres Inovia, l'ONF, le Cirad et d'autres partenaires, il avait pour objectif de faire l'état des stocks de carbone ainsi que d'évaluer leur devenir lors d'un changement d'usage des sols. Le projet a permis de financer une partie des travaux présentés dans ce document sur le devenir du COS lors d'un changement d'usage de la forêt vers l'agriculture (Courte, 2019 ; Fujisaki, 2014).

2.2.1. Stocks de COS par type de sol

Les estimations de COS ont été réalisées grâce aux résultats d'analyses de sols de 236 sites situés le long du littoral guyanais, et référencées 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 21).

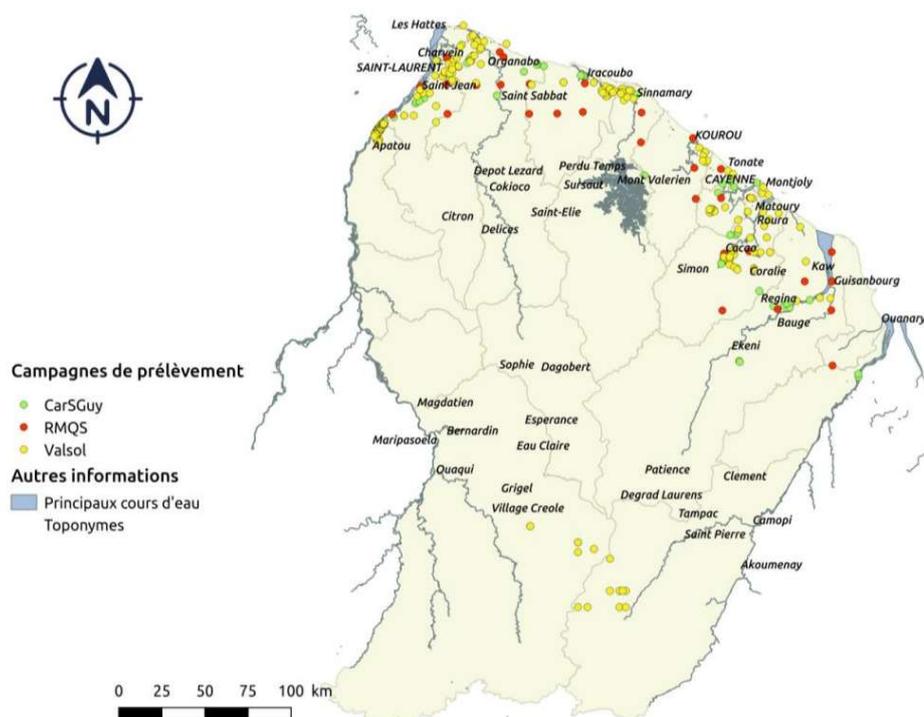


Figure 21 : Carte de répartition des prélèvements de sol issus des bases de données Carsguy, RMQS et Valsol (Courte, 2019)

Dans ces bases, chaque donnée est associée aux caractéristiques physico-chimiques du sol et à un type de sol (Ferrallitols, Réductisols, etc.) sur plusieurs horizons (0-0,3 m, 0,3-0,5 m, 0,5-1 m et 0-1 m). La typologie repose sur le Référentiel Pédologique français dont les sols décrits diffèrent légèrement de la classification internationale utilisée par S. Guitet (voir 1.5).

Avec les informations disponibles dans les bases RMQS et CarsGuy, les stocks de COS en tC/ha ont été calculés à partir de la densité apparente et des teneurs en carbone. La densité apparente n'était pas toujours disponible dans Valsol. Des fonctions de pédotransferts ont là encore été utilisées permettant d'associer les teneurs en argiles granulométriques et en fer à la densité. Finalement, l'agrégation des 3 bases de données, RMQS, CarsGuy et Valsol, a permis d'obtenir les stocks de COS moyens pour les différents types de sols :

	Stock de COS moyen à 0-1 m (tC/ha)
Ferrallitols	138,6
Réductisols	125,9
Podzosols	54,3
Fluviosols	138
Rédoxisols	138

Tableau 4 : Stocks de COS moyens dans l'horizon 0-1 m pour les différents types de sol du littoral issus de bases de données de CarsGuy, RMQS et Valsol (Courte, 2019)

NB : Les incertitudes ne sont pas données dans l'étude.

2.2.2. Stocks de COS sur le territoire guyanais

Afin de calculer le stock de COS sur l'ensemble du territoire, deux méthodes ont été proposées (Courte, 2019). La méthode 1 consistait à utiliser la valeur médiane des stocks de carbone à l'hectare (97,34 tC/ha) et à la multiplier par la superficie totale du territoire. La méthode 2 consistait à attribuer 75 % de la superficie du territoire aux Ferrallitols, 5 % aux Podzosols, 10 % aux Réductisols et Rédoxisols et 10 % aux Fluviosols⁷. Les deux méthodes ont permis d'aboutir aux valeurs suivantes sur l'horizon 0-1 m, et sont en adéquation avec les estimations faites par l'ONF :

	Méthode 1	Méthode 2
Stock de COS (10⁶ tC)	612,437 [389,555 – 915,916]	891,353 [706,685 – 1 231,616]

Tableau 5 : Stocks de COS et intervalle de confiance évalués pour l'ensemble du territoire guyanais dans l'horizon 0-1 m (Courte, 2019)

2.2.3. Carte de répartition des stocks de COS sur le littoral guyanais

Une première approximation de la répartition des stocks de COS sur le littoral guyanais a été proposée. Deux méthodes de spatialisation des stocks de COS sur le littoral guyanais ont été choisies : l'une à l'échelle des types de sols et l'autre à l'échelle des paysages pédo-morphologiques à l'aide de cartes construites dans le cadre du projet (Figure 22).

Un stock moyen de COS a été calculé pour chaque unité de sol et de paysage. Étant composés de différents types de sols en différentes proportions, c'est une moyenne pondérée qui a été utilisée avec les stocks de carbone préalablement calculés grâce aux bases de données (Tableau 4). Finalement, six cartes ont ainsi été produites, représentatives de la répartition du COS en fonction des types de sols et des paysages pédo-morphologiques sur les trois horizons considérés : 0-0,3 m ; 0-0,5 m ; 0-1 m. Seule la carte des stocks à 0-1 m de profondeur en fonction des unités pédologiques est présentée dans ce rapport (

⁷ Proportions obtenues selon avis d'experts.

Figure 23).

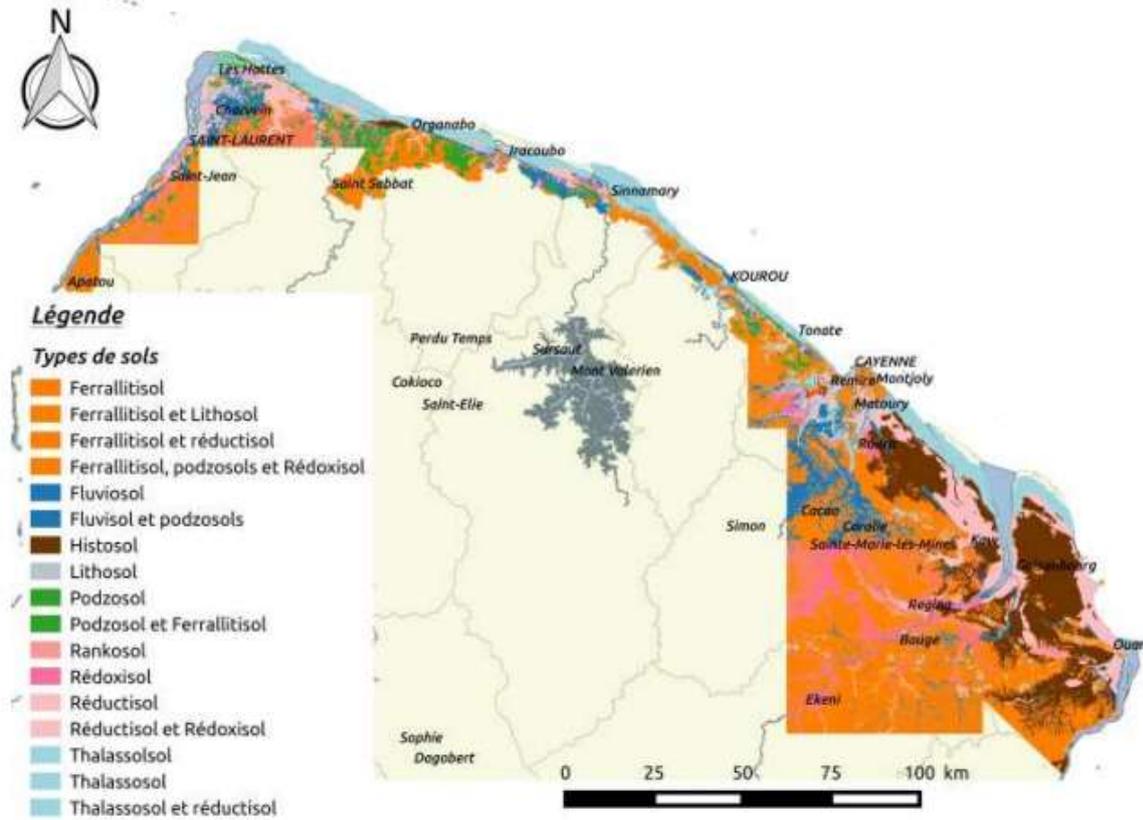


Figure 22 : Carte des types de sol du littoral guyanais construite dans le cadre du projet CarsGuy (Courte, 2019)

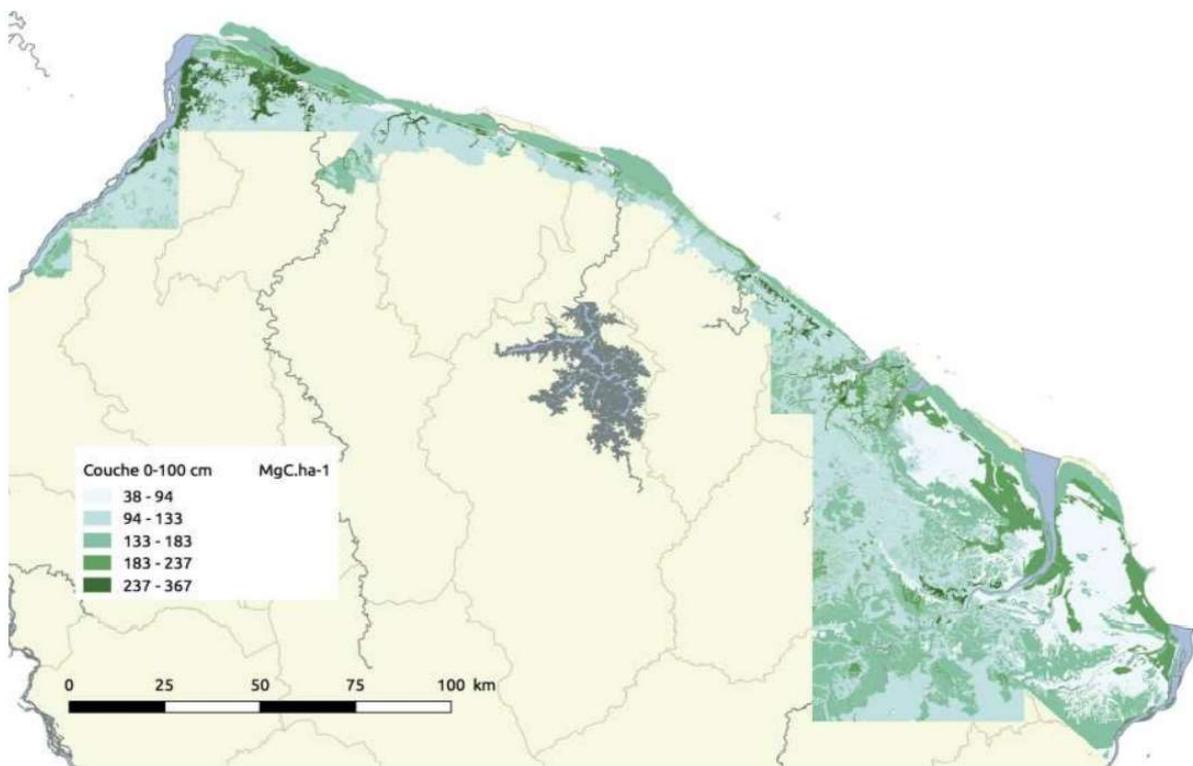


Figure 23 : Stocks de carbone de l'horizon 0-1 m des unités pédologiques du littoral guyanais (Courte, 2019)

Cadre 2 : Deux cartes différentes mais complémentaires

Les deux cartes construites par S. Guitet et A. Courte diffèrent en de nombreux points. L'une a été construite à l'échelle du territoire entier et l'autre du littoral uniquement. Les deux auteurs n'ont pas utilisé les mêmes sites de prélèvement, les mêmes analyses de laboratoire ni les mêmes outils d'évaluation de la densité apparente.

Pourtant, ils considèrent qu'elles n'ont pas vocation à être utilisées séparément, mais de façon complémentaire. En effet, chacune présente des avantages et inconvénients.

2.3. Variations de stocks de COS sur le territoire guyanais

Selon les estimations, les stocks totaux de COS guyanais s'établissent entre 612,4 et 891,4 millions de tonnes de carbone. Les cartes de répartition des stocks par hectare construites dans le cadre des deux projets permettent d'appréhender la variabilité spatiale de ces stocks.

2.3.1. En forêt

Comme pour le carbone aérien, la distribution des stocks de COS sur le territoire guyanais peut être décrite en fonction des habitats forestiers guyanais (Guitet et al., 2015a). Les stocks les plus élevés correspondent également aux habitats de montagnes et de plateaux au centre du territoire et sont évalués à environ 110 tC/ha. Là encore, les stocks de COS les plus faibles

correspondent aux habitats forestiers de la plaine côtière et des dépressions au nord et au sud, avec des valeurs d'environ 90 tC/ha.

2.3.2. Sur le littoral

Sur le littoral, les stocks minimaux sont compris entre 38 et 94 tC/ha (Courte, 2019) et correspondent aux sols peu profonds de l'est guyanais. Les Ferrallitols, qui représentent la majorité des sols, ont des valeurs intermédiaires qui s'établissent entre 94 à 133 tC/ha. Les Ferrallitols remaniés sur les versants ou constituants des vallons possèdent des stocks s'échelonnant entre 133 et 183 tC/ha. Sur la bande côtière, les polders de Mana et les Réductols de l'est constituent des sols aux niveaux de COS élevés avec des valeurs comprises en 183 et 237 tC/ha, de par la présence d'horizons tourbeux. Les sols aux stocks les plus élevés, soit entre 237 et 367 tC/ha, correspondent aux sols hydromorphes à horizons tourbeux, notamment les Fluviosols, Réductols et Rédoxols de marais (à Kaw par exemple) ainsi que les Thalassols sous mangroves (à Ouanary par exemple).

2.4. Sources d'erreurs liées à l'évaluation des stocks de COS

Moins décrite que dans les travaux sur le carbone aérien, l'évaluation des stocks de COS est source d'erreurs. Sur le terrain, la mesure des densités apparentes du sol permettant de convertir la teneur en stock est une importante source d'incertitude. Au moment de l'extrapolation, l'utilisation de valeurs médianes ou moyennes par type de sols ne permet pas de représenter la diversité topologique.

Comme pour le carbone aérien et dans les travaux de cartographie de manière générale, plus le nombre d'analyses sur site sera élevé et moins l'erreur entre les estimations de stock de COS et les valeurs réelles sera importante. Malgré un échantillon relativement faible (n= 236 points de prélèvement), l'étude de Courte (2019) constitue à ce jour la plus forte densité de sites mesurés en climat tropical humide.

2.5. Les stocks de carbone du sol des mangroves

Avec un engorgement en eau qui induit de faibles taux de décomposition de la matière organique (Marchand et al., 2017) et des apports de matière organique piégés grâce à leur forte capacité à retenir les matières en suspension (Bouillon et al., 2004, *in* Marchand et al., 2017), les mangroves présentent a priori une bonne capacité de rétention du carbone. Les travaux précédemment cités prenaient en compte le COS contenu dans le sol de ces forêts côtières. Il était estimé entre 91 et 367 tC/ha, soit une importante variabilité. De manière générique, les mangroves présentent des particularités en de nombreux points et méritent d'être traitées séparément.

L'évaluation des stocks de COS des mangroves est un peu particulière. En effet, l'écosystème s'installe sur les dépôts côtiers dont la dynamique varie au fil des années. Les mangroves les plus âgées sont ainsi les plus éloignées de la ligne côtière et on observe un gradient d'âge des mangroves de l'intérieur des terres vers la côte. Or, à mesure que les mangroves vieillissent, leur sol se forme sous l'action du dépôt de matière organique et de rétention des matières en suspension. On observe ainsi une forte variabilité d'épaisseurs de sol et potentiellement de COS (Figure 24).

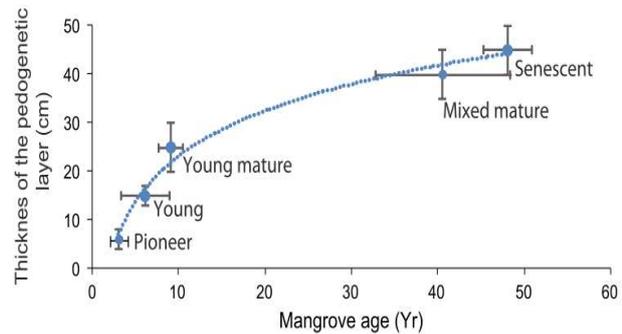


Figure 24 : Epaisseurs du sol des mangroves en fonction de l'âge mesurées à Kaw (Marchand, 2017)

Marchand et al. (2017) et Walcker et al. (2018) ont déterminé les stocks de COS de mangroves guyanaises âgées de 3 à 66 ans et plus, classées par groupe selon leur âge, sur la rive droite du fleuve Sinnamary et dans l'estuaire de la rivière de Kaw respectivement (Figure 25). Les mesures ont été faites à des profondeurs différentes : jusqu'à 1 m (Walcker et al., 2018) et sur la profondeur de la couche en pédogénèse, allant de 9 cm à 50 cm en fonction de l'âge de la mangrove (Marchand et al., 2017).

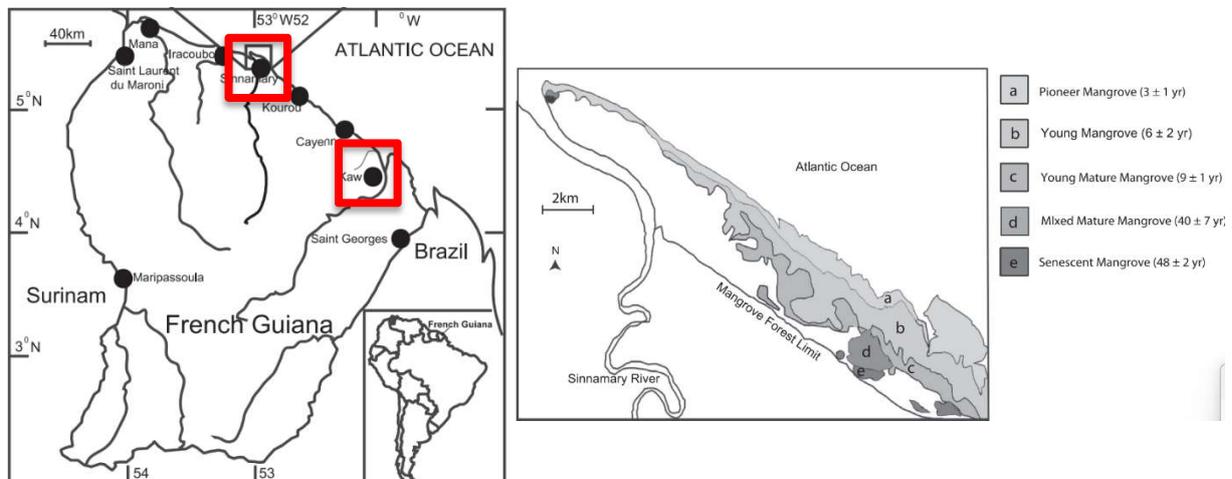


Figure 25 : Localisation des deux sites d'études et schéma en vue aérienne de la répartition des différents types de mangroves sur le site de Sinnamary (Marchand et al., 2017)

Dans les deux cas, les auteurs notent une très grande variabilité des stocks de COS en fonction de l'âge. Walcker et al. (2018) évaluent la moyenne à $84 (\pm 64,14)$ tC/ha, avec des valeurs allant jusqu'à $282 (\pm 74)$ tC/ha pour les mangroves de 66 ans, et $362,97$ tC/ha pour celles dont l'âge n'a pu être identifié, mais supérieur à 66 ans. Pour Marchand et al. (2017), les stocks de COS vont de 4 à 107 tC/ha et augmentent de façon linéaire selon l'âge de la mangrove (Figure 26).

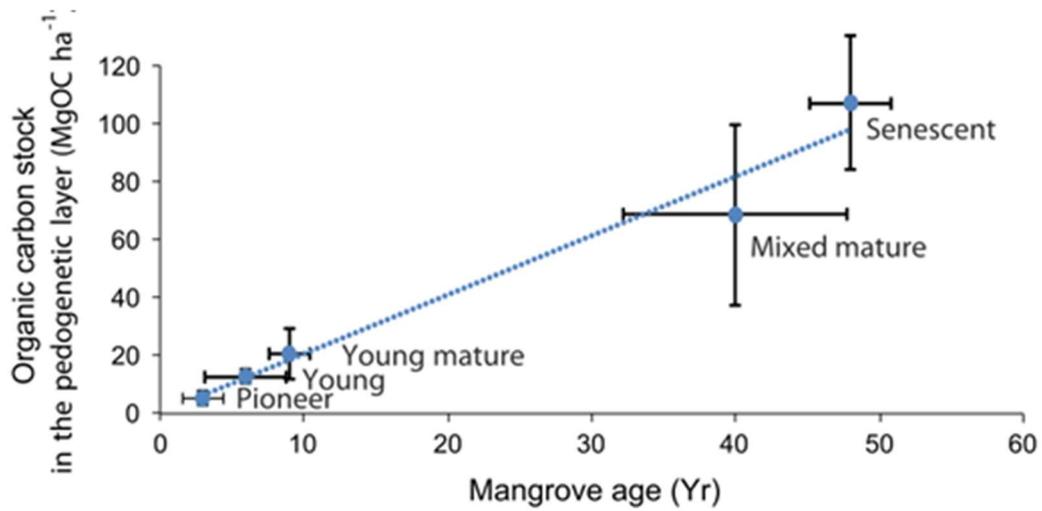


Figure 26 : Stocks de COS des mangroves du site de Kaw en fonction de l'âge (Marchand et al., 2017)

Au cours de l'installation de la mangrove et pendant les premières années de vie, le sol est essentiellement constitué de sédiments marins denses à faible teneur en carbone. Au fil du temps, les couches de sol évoluent avec un fort enrichissement en matière organique en provenance de la litière, entraînant une augmentation des teneurs en carbone mais aussi une diminution des densités apparentes des sols.

3. Quels sont les principaux déterminants des stocks de carbone du sol du territoire guyanais ?

3.1. Déterminants de la variabilité spatiale des stocks de COS

Les deux travaux précédemment cités (Courte, 2019 ; Guitet, 2015) ont permis d'établir les cartes de répartition du COS sur le littoral et sur l'ensemble du territoire guyanais à l'aide de cartes de répartition des types de sols. Préalablement, des stocks de COS moyens par type de sol avaient été établis grâce à un ensemble de mesures réalisées sur le terrain (

Tableau 2 ; Tableau 4). Ils montraient par exemple que les Ferralsols, sols très évolués typiques des régions tropicales avaient des stocks élevés de 128 tC/ha (Guitet, 2015b) et que les sols peu profonds de l'Est avaient des stocks faibles de 38 à 94 tC/ha (Courte, 2019). Ainsi, les types de sols peuvent être considérés comme un déterminant de la variabilité spatiale des stocks.

C'est normal : la taille du stock de COS est déterminée par la quantité de carbone qui y entre (due à la fixation du C organique) et qui en sort (due à la minéralisation ou à l'érosion). Or ces entrées et sorties sont fortement liées aux conditions physico-chimiques ayant abouti à la formation des types de sols présents sur le territoire. Par exemple, c'est le climat qui permet l'altération rapide et intense des sols menant à la formation d'argile fixatrice de matière organique et dont la richesse a été attribuée à une catégorie de sols appelée « Ferralsols ».

Plus généralement, les paysages géomorphologiques (Guitet et al., 2013) représentent bien la façon dont les conditions climatiques ont façonné le paysage. Ainsi, parmi l'altitude régionale, les précipitations annuelles, le type de substrat rocheux, ainsi que d'autres variables, le drainage, la topographie, les paysages géomorphologiques permettent de prédire au mieux la distribution des types de sols (Guitet, 2015). D'autres études réalisées à échelle microscopique ont permis de conclure sur les déterminants spatiaux des stocks de COS. Le taux d'argile et l'engorgement en eau en sont les principaux.

3.1.1. La texture

La texture d'un sol est définie par sa proportion en argiles, limons et sables, trois types de particules de tailles différentes. En Guyane, les propriétés physico-chimiques des sols de 12 sites du dispositif Guyafor ont été étudiées à 0-30 cm de profondeur (Soong et al., 2020). De plus, dans le cadre du projet CARPAGG (Stahl et al., 2016), 14 échantillons de sols récoltés à 0-20 cm de profondeur (Ferralsols et Acrisols) sur 9 exploitations agricoles réparties le long du littoral guyanais ont été analysés (Freycon, 2016). Les deux travaux ont montré que la teneur et les stocks de carbone étaient positivement corrélés à la teneur en argile, allant de 0,4 à 3 % et de 30 à 118 tC/ha respectivement pour des teneurs en argile allant de 0 à 67 % (Figure 27).

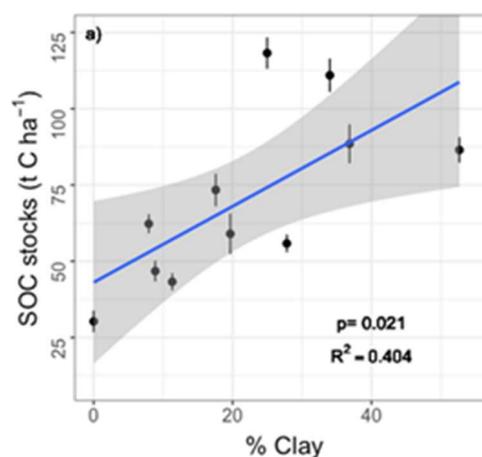


Figure 27 : Stocks de COS à 0-30 cm de profondeur en fonction du pourcentage d'argile sur 12 sites⁸ du dispositif Guyafor (Soong et al., 2020)

⁸ Sur cette figure, seuls 11 sites ont été représentés.

Les sols à texture limoneuse et surtout argileuse sont particulièrement riches en argiles minéralogiques, un type de minéraux correspondant à des agrégations de couches de silicates et d'aluminium. La matière organique du sol issue de la décomposition des végétaux et des animaux et appelée humus s'associe aux argiles minéralogiques pour former des complexes argilo-humiques. Le carbone organique est alors protégé de la minéralisation en CO₂ par les micro-organismes et peut s'accumuler sous cette forme stabilisée. On observe ainsi des stocks plus importants dans les sols les plus argileux.

La texture du sol expliquerait par ailleurs la variabilité de COS observée en fonction de la topographie et de la dynamique hydrique sur territoire guyanais. Epron et al. (2006) ont par exemple observé des teneurs en COS plus élevées en haut des collines que dans les bas-fonds sur le site de Paracou. Or, de manière générale, les sols des hauts de collines sont plus argileux que ceux des bas-fonds. Sur le dispositif ECEREX à St-Elie, Turenne (1982) a observé que les sols du bassin versant à drainage vertical latéral profond présentaient de plus hautes teneurs en carbone que ceux des bassins à drainage latéral vertical superficiel. Or, ces derniers présentaient des sols moins argileux.

3.1.2. L'engorgement en eau

Il est courant d'observer, dans les bas-fonds, des sols noirs. Ces sols présentent souvent des traces physiques d'hydromorphie, témoins d'une saturation régulière en eau (tâches rouilles, bleu-gris ou points noirs, Figure 28). Or la présence d'eau rend le milieu anoxique et empêche la minéralisation du carbone organique qui s'accumule. Les sols deviennent alors noirs à cause de leurs teneurs élevées en matière organique et sont appelés tourbières⁹.

Figure 28 : Réductisol argileux, de fond de talweg. Superposition d'horizons rédoxiques gris et rouille, sur un horizon réductique gris-bleuté à taches rouille, témoignant du caractère permanent, stagnant et oscillant de la nappe
(source : Afes)



A l'échelle du littoral, on observe ainsi des niveaux élevés de COS (entre 183 et 237 tC/ha) dans les polders de Mana et les Réductisols de l'Est présentant des horizons tourbeux, et encore plus dans les sols hydromorphes (Fluvisols, Réductisols, Rédoxisols de marais et Thalassosols sous mangroves) avec des valeurs de 237 à 367 tC/ha dans l'horizon 0-1 m (Courte, 2019).

Pourtant, les études précédemment citées (Freycon, 2016 ; Soong et al., 2020) ont montré que les bas-fonds, pauvres en argiles, avaient de faibles teneurs en COS. Selon B. Ferry (maître de conférences à AgroParisTech), il y a deux cas de figures pour les sols des bas-

⁹ Bien que présentant potentiellement des stocks de matière organique élevés, les sols des tourbières sont connus pour leur mauvais bilan GES. L'asphyxie du milieu due à la présence d'eau provoque la disparition des bactéries aérobies qui minéralisent le carbone organique du sol en CO₂ et l'apparition de bactéries anaérobies dénitrifiantes et méthanogènes productrices de N₂O et de CH₄, de puissants gaz à effet de serre.

fonds : 1) S'il y a de l'eau stagnante en permanence, cela provoque un manque d'oxygène et le sol fonctionne comme celui d'une tourbière. 2) En revanche, s'il y a une alternance de périodes de sécheresse et d'inondation et/ou qu'il y a du courant dans les bas-fonds, il n'y a pas d'accumulation de matière organique. Par exemple, les sols superficiels (10-20 cm de profondeur) des bas-fonds inondés de façon saisonnière de Paracou ont des teneurs en COS plus faibles que les plateaux (Allié et al., 2015).

Un deuxième effet de l'engorgement en eau des sols est la solubilisation du fer en Fe^{2+} . Le fer permet la formation de micro-agrégats. Si la quantité de fer diminue, cela se traduit par une diminution de la rétention, par moins d'argiles et donc moins de matière organique. Il y a là encore deux phénomènes contraires en termes d'effet sur le stock de COS, qui fonctionnent sur des pas de temps différents. Sur un temps long (dizaine de milliers d'années), on observe l'élimination du fer. Sur un temps plus réduit (un à deux siècle), il y a accumulation de COS due aux conditions d'anoxie (B. Ferry).

NB : Indépendamment de la topographie et du type de sol, une forte pluviosité peut provoquer une saturation en eau. Spain et al. (1983) et Schuur et al. (2001) dans Freycon (2016) ont ainsi montré que la pluviosité était positivement corrélée à la teneur en carbone du sol en zone tropicale. En Guyane, la teneur en COS en fonction de la pluviosité a été étudiée par Desprez et al. (2010) sur les sols du dispositif Guyafor à une profondeur de 0-20 cm. Les auteurs ont montré que plus la pluviosité annuelle des sites était importante, plus les teneurs en COS augmentaient (sauf pour le site de Montagne Plomb, caractérisé par des sols à éléments grossiers abondants).

3.1.3. Autres variables n'intervenant pas dans la variabilité spatiale des stocks de COS

- **La biomasse aérienne**

Les compartiments terrestres sont interdépendants. Notamment, la biomasse aérienne tombée au sol et dégradée par la micro-faune, la macro-faune mais aussi la micro-flore est à l'origine de l'entrée de C 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, le compartiment aérien apportant davantage de biomasse biodégradable.

Or, à l'échelle du territoire, une étude spécifiquement réalisée en Guyane a montré qu'il n'existait aucune corrélation linéaire entre les stocks de CA mesurés sur les 12 sites du dispositif Guyafor et leurs stocks de COS mesurés à 0-30 cm de profondeur (Soong et al., 2020).

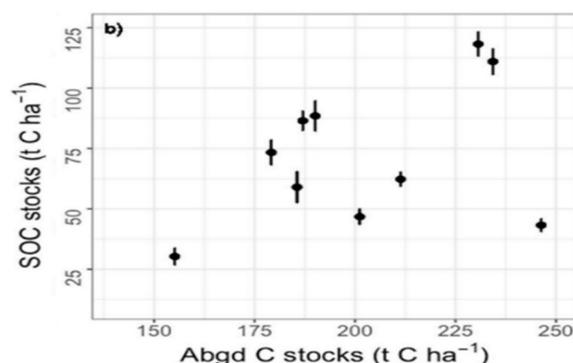


Figure 29 : Stocks de COS en fonction du stock de CA sur 10 sites du dispositif Guyafor (Soong et al., 2020)

Ainsi, ces résultats montrent que les phénomènes de dégradation du CA mettent en jeu des mécanismes chimiques et biologiques plus complexes qu'un simple flux de C d'un compartiment à l'autre. Ils sont abordés notamment en 5.3.2 car sont à l'origine de certaines observations faites à la suite de l'adoption de certaines pratiques agricoles.

- **Les occupations humaines anciennes**

Au Brésil, des terres noires composées d'un mélange de matière organique (dont du charbon et des déchets alimentaires) et de sol ont été retrouvées en importante quantité. Formées par d'anciennes civilisations, elles sont appelées « terra preta dos Indios ». Elles sont reconnues pour leur fertilité (Glaser and Birk, 2012) ainsi que leur teneur en COS plus élevée sur les couches superficielles (à 0-30 cm de profondeur) que pour les sols voisins.

En Guyane, quelques sites de *terra preta* ont été retrouvés mais de façon beaucoup moins marquée qu'au Brésil. Sur les sites anciennement occupés par les Amérindiens (par exemple sur les Montagnes Couronnées), on trouve des sols moins sombres que les *terras pretas*, mais plus sombres que les sols voisins. Ils sont appelés « terra mulata ». Leur teneur en COS est également plus élevée que celle des sols voisins, avec une différence de 20 à 90% suivant les sites (Bruno et Birk, 2012).

Cadre 3 : Variabilité verticale du COS

La variabilité verticale du COS en fonction de la profondeur est un résultat classique et non spécifique aux sols de Guyane. En effet, comme il est issu de la biomasse aérienne en décomposition, plus on s'éloigne de la surface et moins les couches en sont riches. C'est ce qu'a montré Courte (2019), en évaluant les stocks de COS à 60 tC/ha et 26,1 tC/ha en moyenne pour les horizons 0-30 cm et 30-50 cm respectivement.

La profondeur de sol classiquement utilisée pour les mesures de stocks de COS est de 30 cm. Par ailleurs, le GIEC indique de prendre cette profondeur par défaut pour les calculs de variation de carbone dans le sol lors d'un changement d'usage des sols (GIEC, 2003). Pourtant, des études assez récentes remettent en question ce dogme classique, en montrant l'importance des couches profondes (à 50-100 cm) dans le stockage de carbone (Stahl et al., 2016). Ne pas les prendre en compte pourrait donc ainsi minimiser le pouvoir de stockage du sol de certains écosystèmes comme les prairies (Cadre 7).

3.2. Variabilité temporelle des stocks de COS guyanais

En 2004, une étude sur l'évolution du COS sous forêt non perturbée été initiée 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 campagne de mesures en 2022 permettra de finaliser les résultats (V. Freycon). Il n'existe pas de données ni de rapports publiés pour l'instant sur ces données préliminaires.

Finalement, les seules mesures concernant l'évolution du COS de Guyane dans le temps sont celles qui ont été réalisées dans le cadre du projet CARPAGG (Blanfort et al., 2012 ; Blanfort et al., 2013 ; Stahl et al., 2016, 2017) et CarsGuy (Fujisaki et al., 2017 ; Courte, 2019). Elles avaient pour vocation première d'étudier l'évolution de COS lors d'une transition forêt/agriculture et sont donc présentées dans la partie 4.1.

3.3. Le cas des mangroves

La mangrove est un écosystème complexe en perpétuelle évolution. Indépendamment de l'effet de l'âge dans l'augmentation des stocks de COS (Marchand et al., 2017 ; Walcker et al., 2018), elle pousse sur des sédiments en provenance des fleuves amazoniens. Ainsi, elle

présente des cycles d'apparition et de disparition dus aux phases d'accrétion et d'érosion de la côte.

Plusieurs travaux ont étudié la dynamique des mangroves guyanaises (Augustinus, 1978 ; Choubert et Boyé, 1959 ; Gratiot et al., 2008). Plus récemment, Walcker (2015) a étudié l'impact de la variabilité climatique naturelle sur celles-ci. Il conclut que l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) est le principal facteur explicatif des périodes d'apparition et de disparition de la mangrove guyanaise avec une périodicité de 64 ans¹⁰. Au cours d'une période de faible énergie de vagues due à une phase négative de l'ONA, le dépôt de matières en suspension dans des réservoirs de vase est favorisé. Au contraire, au cours d'une période de forte énergie due à une phase positive de l'oscillation, la vase accumulée pendant la période précédente est remise en suspension et transportée.

Ainsi, les surfaces de mangroves évoluent en Guyane, et ce de façon cyclique (Figure 30). Cependant, les phases d'accrétion et d'érosion ainsi que leur puissance sont modelées par les courants. La position de la mangrove sur la côte est donc également un déterminant de variabilité spatiale, mais aussi temporelle. Par exemple, l'observation de l'évolution de la côte à Mana, Sinnamary et Cayenne permet de voir que ce ne sont pas les mêmes phases qui agissent d'un endroit à l'autre de la Guyane (C. Proisy).

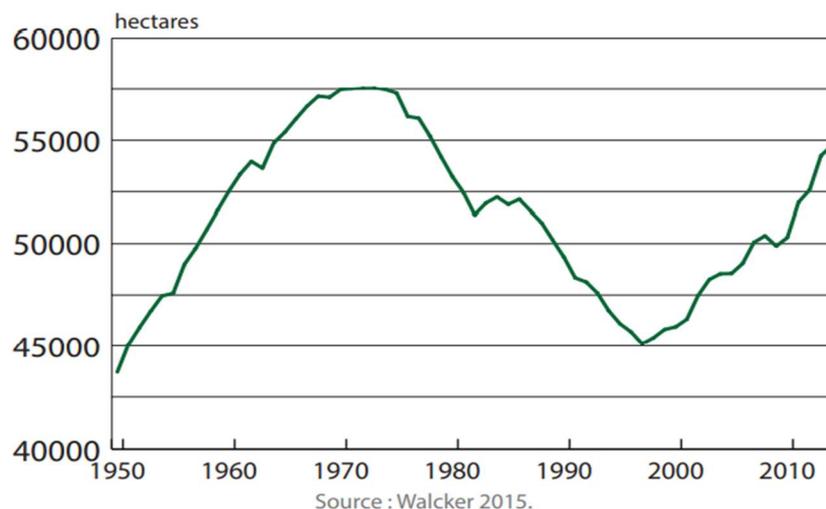


Figure 30 : Evolution des surfaces occupées par les mangroves en Guyane de 1950 à 2015 (Walcker, 2015)

Ainsi, si l'âge de la mangrove influe principalement sur les stocks de COS retrouvés localement, c'est la dynamique d'installation et de disparition de l'écosystème qui joue sur les stocks à l'échelle du territoire guyanais. Un des grands enjeux des chercheurs spécialisés dans le domaine est de prévoir cette dynamique.

¹⁰ L'oscillation Nord Atlantique ONA (ou NOA pour North Atlantic Oscillation en anglais) est un phénomène climatique semblable au populaire « El Niño ». Il s'agit de mouvements de va-et-vient de masses d'air en provenance du nord de l'Arctique et de l'Islande vers les Açores et la pointe sud-ouest de l'Europe (l'Espagne et le Portugal, plus connue sous le nom de « péninsule Ibérique ») occasionnant des changements de pression atmosphérique au sol.

Cadre 4 : Les mangroves, des puits et sources de carbone par intermittence

La mangrove se développe sur les sédiments vaseux côtiers initialement pauvres en carbone organique. Or on retrouve des stocks importants dans le sol des mangroves, notamment les plus âgées (Marchand et al., 2017 ; Walcker, 2018). Elles agissent donc bien comme un puits, piégeant le carbone issu de la biomasse aérienne. Marchand et al. (2017) ont montré que les mangroves guyanaises étaient capables de stocker 0,72 à 4,86 tC/ha/an selon l'âge et la position.

Or, avec ces phases d'accrétion et d'érosion, une partie de ce carbone accumulé et stocké est libéré dans les sédiments côtiers en migration. Ils seraient rapidement dégradés, entraînant des émissions de CO₂ et de CH₄ (Walcker, 2018). Ce statut de « puits » de carbone ne serait que temporaire. Les faibles taux de minéralisation induits par l'engorgement sont en fait compensés par l'exportation de la matière organique par la marée.

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

Avec 26 % de croissance démographique depuis 2010 d'après l'INSEE, la Guyane est un territoire en développement qui a besoin d'étendre son activité économique. Or, avec une surface recouverte à 95 % de forêt, l'écosystème est nécessairement visé. Entre 1990 et 2012, on estime que 1 780 ha/an de forêt ont été convertis en zones agricoles, 1 280 ha/an en infrastructures (dont zones d'exploitation minière) et 2 150 ha/an en zones humides avec la mise en eau du barrage de Petit-Saut¹¹ (IGN, 2015, d'après Lefèbre et Verger, 2014).

Un changement d'usage des sols, notamment la suppression de l'état forestier, entraîne des conséquences immédiates sur les stocks de carbone aérien. Or les compartiments terrestres sont interdépendants. Ce changement a donc également des répercussions sur la composition, le fonctionnement et ainsi sur les stocks de C du sol. Il met en jeu des phénomènes complexes, moins perceptibles et immédiats que ceux liés au CA, qui ont été notablement étudiés en Guyane.

4.1. 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 du projet CarsGuy sur le site de Combi (Fujisaki et al., 2017) et sur plusieurs exploitations du littoral (Courte, 2019), ainsi que dans le cadre du projet CARPAGG (Blanfort et al., 2013 ; Stahl et al., 2016 ; Stahl et al., 2017). Les techniques utilisées pour la défriche diffèrent (avec et sans brûlis notamment), et les résultats ne sont pas réellement comparables.

¹¹ A l'échelle de la surface forestière totale guyanaise (8,1 millions d'hectares), le recul de la forêt à la suite de l'avancée des zones agricoles et d'infrastructures s'observe encore peu. En effet, entre 1990 et 2015, elle a perdu seulement 1 % de sa surface (IGN, 2015).

4.1.1. Résultats du projet CarsGuy

Sur le site de Combi (Fujisaki et al., 2017), trois agrosystèmes ont été implantés 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. Les analyses de sol ont été faites annuellement jusqu'à 5 ans après la déforestation sur les 30 premiers cm, et ont permis de représenter l'évolution des stocks de COS dans les trois agrosystèmes en fonction du temps.

Jusqu'à un an et demi après la déforestation, les auteurs observent une augmentation du stock de COS dans les trois agrosystèmes mis en place, grâce aux débris de bois laissés au sol permettant un enrichissement en carbone. En revanche, cinq ans après la déforestation, le carbone apporté par les débris rapidement minéralisés ne contribue déjà plus aux stocks COS (Figure 33).

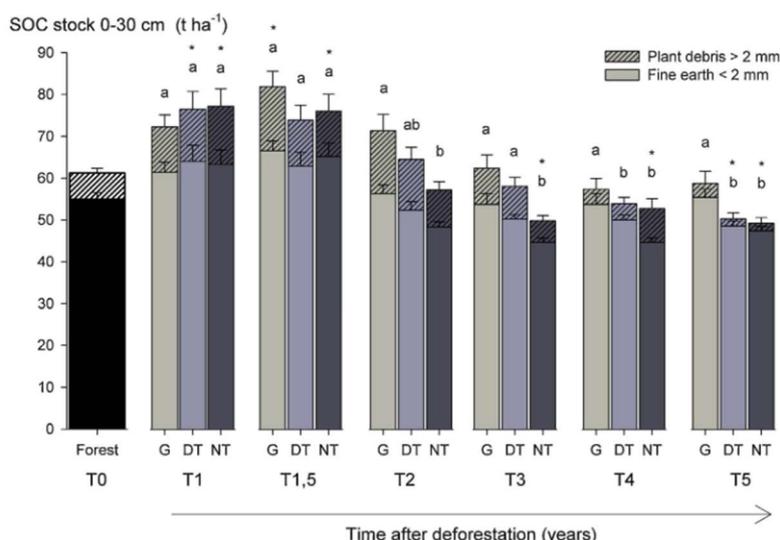


Figure 31 : Evolution des stocks de COS de 0 à 5 ans après la défriche à 0-30 cm de profondeur (Fujisaki et al., 2017)

G = pâturage ; DT = maïs/soja avec labour ; NT = maïs/soja sans labour

Cinq ans après la déforestation, les deux systèmes de cultures annuelles avec et sans travail du sol ont fait perdre respectivement 11,5 % et 13,8 % du COS initial de la forêt. En revanche, dans la prairie fauchée, le stock de COS n'est pas différent significativement de celui rencontré sous forêt. Ces observations, conformes à celles rencontrées dans le reste de l'Amazonie (Fujisaki et al., 2015), s'expliquent par de plus faibles restitutions de carbone dans le sol dans les systèmes annuels comparés à la forêt et à la prairie, et à une augmentation du taux de minéralisation de la matière organique dans les systèmes annuels (Fujisaki et al., 2017).

4.1.2. Résultats du dispositif CARPAGG

Dans le cadre du projet CARPAGG (Blanfort et al., 2013 ; Stahl et al., 2016 ; Stahl et al., 2017) (Cadre 6), des stocks de COS ont été mesurés le long d'une chronoséquence composée de 24 prairies âgées de 6 mois à 36 ans et de 4 sites forestiers (témoins). Elles ont toutes été mises en place après une défriche avec brûlis. 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. L'origine du COS a également été déterminée en mesurant la composition isotopique du carbone.

Cadre 5 : Le dispositif CARPAGG

Le dispositif CARPAGG (CARbone des PÂturages de Guyane et Gaz à effet de serre) a étudié entre 2010 et 2013 les potentiels de stockage de carbone dans les sols des pâturages issus de déforestation en situation réelle dans les systèmes herbagers d'élevage bovin de la zone côtière guyanaise. Porté par le Cirad (UMR Selmet) en collaboration avec INRAe (UMR UREP) et financé en partie par l'Observatoire du Carbone de Guyane Energie Climat, il a permis de mieux cerner les effets de la mise en place d'une prairie à la suite de la déforestation sur les dynamiques du carbone (stocks, flux...) ainsi que sur le bilan gaz à effet de serre. En prenant en compte le stockage de carbone dans les horizons profonds, ces recherches montrent notamment que les prairies issues de déforestation en Guyane fonctionnent comme des écosystèmes stockeurs de carbone à condition de les pérenniser sur plusieurs décennies.

	Forêts témoins	Prairies < 20 ans	Prairies > 20 ans
Stocks moyens de COS (tC/ha)	99.6 +/- 7.3	85.5 +/- 5,6	117.7 +/- 9.6

Tableau 6 : Stocks de COS à 0-1 m mesurés dans le cadre du projet CARPAGG
(Stahl et al., 2017)

La comparaison des stocks de COS à 0-1 m de profondeur montre une différence significative entre les prairies de plus de 20 ans d'une part, et les prairies récentes et les forêts témoins d'autre part (Tableau 6). D'après les auteurs, durant les deux premières décennies suivant la déforestation, il y a d'abord une forte variabilité d'évolution du COS en partie liée aux pratiques de mise en place des prairies. Ceci se traduit par une légère diminution des stocks. Ensuite, au-delà de 20 ans, il y a une augmentation significative.

En effet, les analyses isotopiques ont pu montrer que les stocks de COS provenant des graminées (plantes en C4) augmentaient dès la mise en place des prairies grâce à la dégradation rapide des racines de ces plantes. A l'inverse, les stocks de carbone issus d'espèces héritées de la forêt comme les espèces ligneuses ou des légumineuses (plantes en C3) diminuaient rapidement durant les deux premières décennies d'implantation des prairies. A partir de 25 ans, le stock de carbone issu d'espèces autres que des graminées (probablement des espèces adventices comme des herbes ou arbustes non fourragers et/ou des légumineuses) était en forte augmentation. Finalement, à partir de 25 ans environ, les stocks de COS de la prairie devenaient supérieurs à ceux de la forêt (Figure).

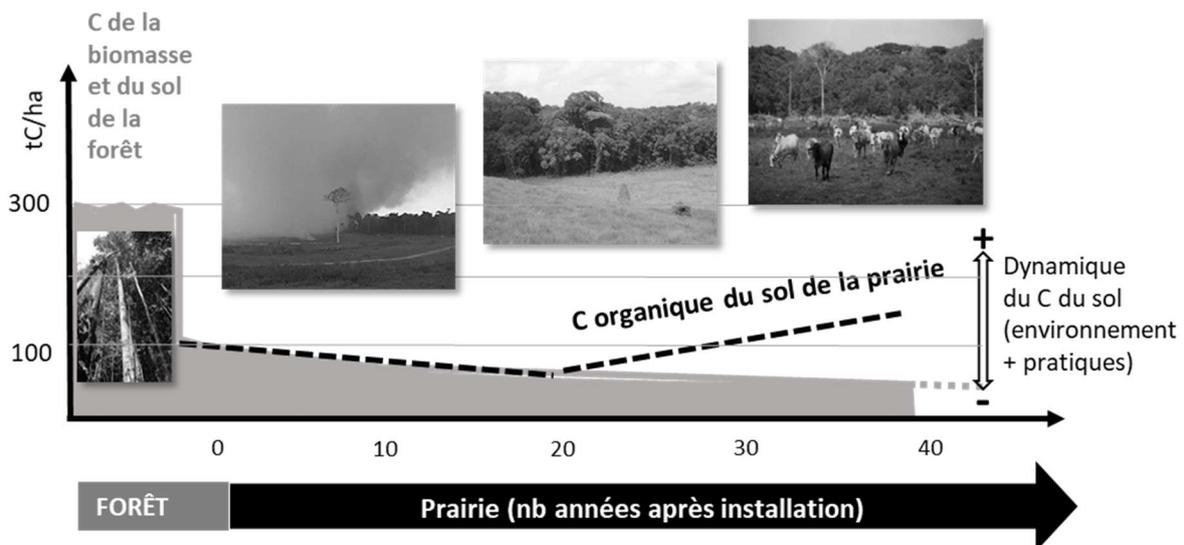


Figure 32 : Schéma théorique de l'évolution des stocks de COS des prairies (en pointillés) et des stocks de C de la biomasse et du sol des forêts (en gris) à la suite de la conversion d'une forêt en prairie (V. Blanfort)

4.1.3. Conclusion

Au-delà de l'effet indiscutable de la déforestation sur les pertes de carbone aérien ainsi que les émissions de GES, les projets CARPAGG et CarsGuy ont montré la capacité de certains agrosystèmes (les prairies) à retrouver un stock de COS équivalent ou supérieur à celui des forêts d'origine quelques années 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 gestion mises en place par la suite. Les résultats du projet CARPAGG montrent que les prairies sur sol ferrallitiques de plateau peuvent potentiellement rétablir les stocks de COS des forêts d'origine 25 ans après leur mise en place.

Dans le cadre du projet CarsGuy, des prélèvements et des analyses de sol ont également été réalisés chez 10 agriculteurs guyanais installés depuis 5 à 20 ans et dont les productions et niveaux d'intensification diffèrent (arboriculture, maraîchage, grandes cultures et prairies à « faible impact » et « fort impact ») (Courte, 2019). Les résultats ont été comparés aux stocks de carbone mesurés sous forêt dans des sites adjacents, considérés comme les stocks avant le changement d'usage du sol (approche synchronique).

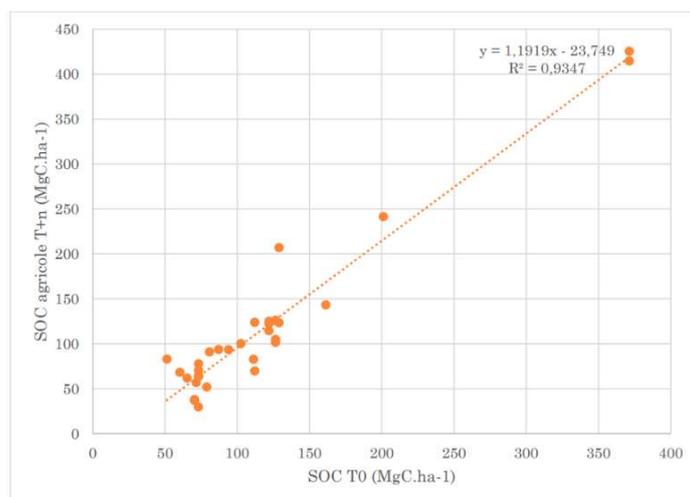


Figure 33 : Stocks de COS agricoles en fonction des stocks de COS forestiers mesurés chez les 10 agriculteurs (Courte, 2019)

Cadre 6 : La prairie guyanaise : source ou puits de carbone ?

Si le débat sur le rôle de puits ou de source de carbone de la forêt tropicale anime les scientifiques, il importe également de prendre en compte les processus de changement d'utilisation des terres. Déforester pour créer des pâturages entraîne des impacts environnementaux significatifs avec des émissions de CO₂ ponctuelles mais conséquentes (combustion de la biomasse) et des pertes de biodiversité. La lutte contre la déforestation reste ainsi une priorité mais elle doit s'accompagner d'une gestion plus durable des surfaces déforestées (Blanfort et al., 2022).

Les résultats obtenus dans le cadre du dispositif CARPAGG (Blanfort et al., 2013) montrent que les prairies issues de déforestation en Guyane fonctionnent comme des écosystèmes stockeurs de carbone, à condition de les pérenniser sur plusieurs décennies (Stahl et al., 2017). Après une vingtaine d'années, le stockage s'élève potentiellement à $1,27 \pm 0,37$ tC/ha/an, tandis que la forêt d'origine voisine stocke $3,23 \pm 0,65$ tC/ha/an (dispositif Guyaflux INRAe). L'accumulation de carbone sous forme stabilisée se réalise dans les horizons inférieurs, entre 0,3 et 1 m de profondeur (Stahl et al., 2016). Ce niveau de stockage représente un potentiel d'atténuation significatif lié au maintien dans le temps d'un couvert prairial productif et non dégradé (dense, non érodé) se développant sur un sol conservant de bonnes qualités physico-chimiques. Il s'agit notamment d'appuyer l'implantation de pâturages avec un mélange de graminées et de légumineuses favorisant les entrées d'azote dans le sol. La mise en place d'un mode d'exploitation par pâturage tournant et d'un chargement adapté est également indispensable au maintien toute l'année d'une biomasse couvrante et active. L'entretien de la végétation par gyrobroyage est nettement préférable au nettoyage par le feu, qui induit des pertes d'azote et une modification de l'activité biologique. On constate par ailleurs que les conditions favorables à l'accumulation de carbone dans la matière organique des sols sous pâturage favorisent également la production d'une ressource fourragère en quantité et qualité.

Si la stratégie de séquestrer le carbone dans le sol constitue un potentiel d'atténuation avéré pour les systèmes d'élevage au pâturage, elle présente aussi des limites. Les stocks du sol sont en effet fragiles et peuvent être altérés de multiples manières : par un changement d'usage des terres, une augmentation de la température ou par différentes pratiques de fertilisation ou autres travaux du sol.

4.2. Des occupations humaines vers la forêt : cas de la revégétalisation de sites miniers

Trois auteurs ont travaillé sur le suivi d'anciens sites miniers guyanais abandonnés depuis quelques années déjà : Schimann et al. (2012), Couic et al. (2018) et Le Chanoine du Manoir de Juaye (2021) dans le cadre du projet Carbiosol (Cadre 7). De manière générale, ces travaux ont porté sur l'évaluation de la qualité de restauration écologique des sites. Pour rappel, les exploitants miniers sont tenus de réhabiliter les sites miniers après exploitation. Parmi les différentes opérations d'ingénierie écologique appliquées aux mines, on distingue la réhabilitation¹² et la régénération¹³.



Figure 34 : Photographie d'un site réhabilité (à gauche) et régénéré (à droite) (source : Couic et al., 2018 ; Compagnie minière Espérance)

Plusieurs anciens sites miniers répartis à travers la Guyane ont été étudiés : un site de la compagnie minière Boulanger exploité jusqu'à 2001 et revégétalisé avec *Acacia mangium* et *Clitoria racemosa* (Schimann et al., 2012), les sites Boulanger, Georgeon, Grand Chardy, Yaoni and La Boue exploités jusqu'à 2005 au plus tard (Couic et al., 2018) et le site de la Société des Mines de Saint-Élie exploitée jusqu'à 1998 et revégétalisée en 2012 avec des plants d'*Inga edulis* inoculés et mycorhizés au préalable et dont les analyses ont été faites en 2021 (Le Chanoine du Manoir de Juaye, 2021).

Les auteurs ont essentiellement mobilisé des indicateurs microbiens (l'activité respiratoire potentielle SIR pour Substrate-Induced Respiration, considérée comme un proxy de la biomasse microbienne totale active du sol MBC, pour Microbial Biomass Carbon) afin de mesurer la capacité des sols à reconstituer leurs fonctions (notamment dans les cycles des nutriments).

C'est en effet une mesure intéressante car facilement accessible. De plus, les micro-organismes offrent un temps de réponse aux perturbations de leur environnement très rapide (Schimann et al., 2012). Bien qu'ils donnent une indication sur la dynamique de minéralisation du COS et donc le déstockage de carbone dans le sol, les résultats ne seront pas détaillés dans ce rapport.

Les auteurs ont également mobilisé des mesures de teneur en carbone (Couic et al., 2018) et de stocks de COS (Le Chanoine du Manoir de Juaye, 2021). Ils ont comparé des sites réhabilités, régénérés selon différentes pratiques, et des forêts environnantes naturelles. Les résultats de chacune des études permettent de tirer des conclusions sur l'impact de l'activité minière sur les stocks de COS.

¹² Fermeture des mines et nivellement du terrain afin de faciliter la régénération naturelle.

¹³ Ajoute aux opérations de régénération une action presque systématique de revégétalisation.

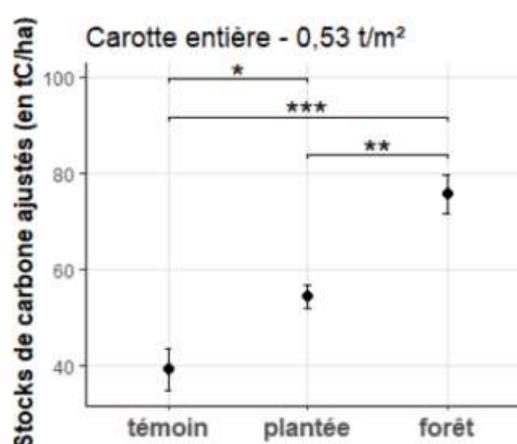
Cadre 7 : Le projet Carbiosol

Le projet Carbiosol a été initié en 2017 dans le contexte de l'initiative 4 pour 1000 par l'UMR EcoFoG et financé par des fonds européens FEDER via AgroParisTech Innovation. Il vise à étudier l'impact de la revégétalisation par des Fabacées sur le stock de COS et sur les microorganismes du sol. Ces revégétalisations ont été faites dans deux contextes : en contexte agroforestier dans un but de production de biomasse pour la filière biomasse énergie, et en contexte minier pour les revégétalisations dans le cadre réglementaire en fin d'exploitation. Une partie des résultats, notamment dans le premier contexte, est en cours de publication.

4.2.1. Effets de l'activité minière

Tout d'abord, les résultats montrent des valeurs de stocks de COS de 25 à 50 % plus faibles sous sites réhabilités (« témoin ») et régénérés (« plantée ») que sous forêt, à 0-1 m de profondeur (Figure 37). Ces observations se traduisent également en termes de teneurs, avec des valeurs de 72 à 85 % plus faibles sur les horizons très superficiels (0-10 cm de profondeur) (Tableau 7).

Figure 35 : Stocks de COS sous site réhabilité (« témoin »), régénéré (« plantée ») et forestier à 0-1 m de profondeur (Le Chanoine du Manoir de Juaye, 2021)



Site	forêt naturelle	ayant subi l'activité minière (jusqu'à 2001)		
		Site réhabilité non régénéré	Site régénéré en monoculture	Site régénéré en polyculture
Teneur en COS (g/kg)	54	6,01	10,55	15,58

Tableau 7 : Valeur de carbone organique du sol total mesuré à 0-10 cm de profondeur 17 ans après l'arrêt de la mine (Couic, 2018)

De plus, Schimann et al. (2012) et Le Chanoine du Manoir de Juaye (2021) observent un fort impact de l'activité minière sur les processus microbiens avec, entre autres, une forte diminution de la biomasse microbienne dans les zones perturbées par rapport aux forêts naturelles de référence, ainsi qu'une modification de la structure des communautés.

4.2.2. Effets de la revégétalisation

Les stocks ainsi que la teneur en COS sont toujours significativement plus élevés sur les sites régénérés que sur les sites réhabilités (Figure 37 ; Tableau 7). Les valeurs de carbone microbien et de respiration par les microorganismes sont également plus élevées (Schimann et al., 2012 ; Couic et al., 2018). Ainsi, ces résultats montrent l'effet bénéfique de la

revégétalisation, qui ne permet pas toujours de retrouver les fonctions initiales mais qui améliore la récupération des stocks de COS et le fonctionnement biologique du sol.

4.2.3. Effets des espèces végétales plantées

Plus spécifiquement, Couic et al. (2018) ont évalué l'importance de la diversité des espèces plantées en comparant différents protocoles de revégétalisation : un site régénéré avec une monoculture d'*Acacia mangium* et un site régénéré avec une association d'*Acacia mangium*¹⁴ et *Clitoria racemosa*.

Les résultats montrent que l'association d'*A. mangium* et de *C. racemosa* a permis une amélioration significative des teneurs en carbone par rapport à la monoculture d'*Acacia* (Tableau 7). Par ailleurs, une valeur plus importante de MBC montre que l'augmentation de la biodiversité permet d'encourager le développement de nouvelles communautés microbiennes impliquées dans les cycles biogéochimiques des macroéléments (Couic et al., 2018), tout en restant néanmoins limitée par rapport aux valeurs rencontrées dans les sols témoins naturels.

4.2.4. Evolution du COS à long terme

Dans son étude, Le Chanoine du Manoir de Juaye (2021) a simulé l'évolution du COS dans les premiers 50 cm du sol des parcelles revégétalisées grâce au modèle RothC, outil de modélisation des échanges de C au sein du compartiment sol, très proche du modèle Century (Cadre 8).

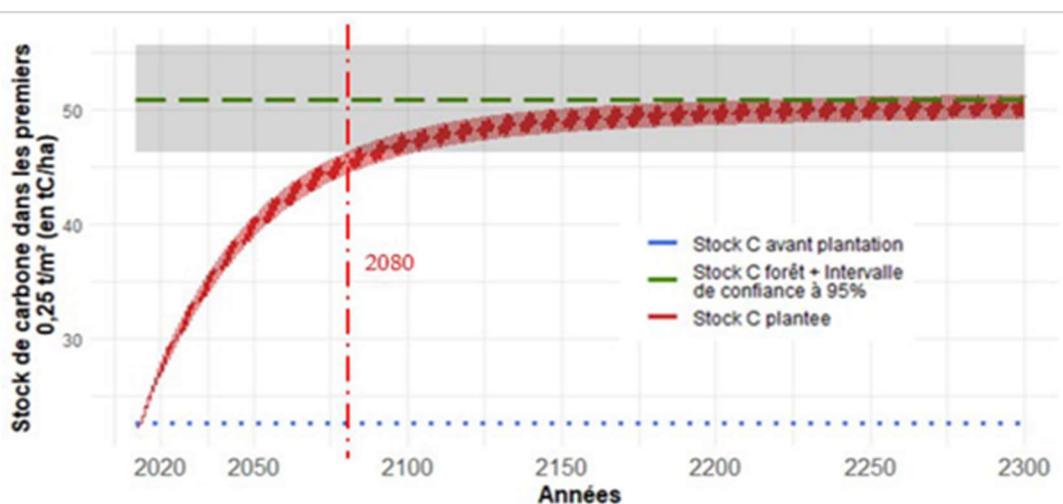


Figure 36 : Evolution du stock de COS à 0-50 cm de profondeur en fonction du temps dans une parcelle revégétalisée, modélisée par le modèle RothC

Par simulation, l'auteur a ainsi montré que les stocks ne seront plus significativement différents de ceux mesurés sous la forêt d'ici 2080 (pour un site revégétalisé en 2012). En effet, la mesure du quotient respiratoire journalier et microbien (témoignant des pertes de carbone lors de la respiration) suggère que les micro-organismes auraient une meilleure efficacité d'utilisation du carbone du sol dans les parcelles revégétalisées qu'en forêt. A long terme, cela pourrait conduire, selon l'auteur, à un stockage plus durable du carbone dans le sol.

¹⁴ Attention, cette espèce est considérée comme envahissante en Guyane.

Cadre 8 : Le modèle Century

Le modèle Century (Parton, 1996) est un modèle informatique de modélisation des flux de COS. Il est basé sur des échanges entre des compartiments conceptuels de carbone et l'ensemble de ces compartiments forme le COS total. Il est constitué de 5 compartiments : les apports de C décomposables et résistants, la biomasse microbienne, le COS humifié et le COS inerte. La cinétique des échanges dépend de variables liées au climat, au sol et à l'agrosystème dont les caractéristiques sont renseignées par l'utilisateur.

4.3. De la forêt vers les milieux aquatiques : cas du barrage de Petit Saut en Guyane

Le barrage hydroélectrique de Petit-Saut est situé sur les communes de Sinnamary et de Saint-Elie. Sa mise en eau en janvier 1994 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.

Combinée aux conditions tropicales de la Guyane, l'immersion de la matière organique a mené à des phénomènes complexes de dégradation. Les feuilles des arbres ont d'abord très rapidement été décomposées. Les scientifiques estiment que l'intégralité de cette matière organique facilement dégradable a disparu en 4 ans maximum après la mise en eau (Fanny Colas, INRAe), représentant 200 000 tonnes de C perdues.

La majeure partie de la biomasse aérienne, contenue dans les troncs et branches, était constituée de composés lignocellulosiques très difficilement dégradables (même sous l'eau). 20 ans après la mise en eau, 20 %¹⁵ seulement du C des troncs a été perdu (F. Colas). C'est pourquoi on retrouve des arbres encore debout dans la retenue (Figure 39).

Le sol, constitué d'une importante part de carbone facilement dégradable (comme la biomasse microbienne) a nettement contribué, avec la biomasse aérienne facilement dégradable, aux pertes de C. Aujourd'hui, on considère que la moitié du COS du réservoir a été perdue dans l'atmosphère sous forme de CO₂, mais aussi de CH₄, un puissant GES classant par ailleurs le barrage en dehors des énergies dites « vertes » par l'Ademe (cf annexe « Bilan des émissions de gaz à effet de serre »).

¹⁵ Dans ces pertes, on retrouve aussi celles liées à la chute des arbres dans l'eau et à l'action des termites. La part de ce C minéralisée et dégazée dans l'atmosphère à la suite de l'inondation de la matière n'est pas connue.



Figure : Photographie de troncs submergés qui ne se sont pas décomposés dans la retenue du barrage de Petit-Saut (source : Ademe, Observatoire du Carbone)

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

5.1. Effets des pratiques d'exploitation forestière : cas de la production de bois à des fins énergétiques

Des travaux réalisés en Guyane ont permis de montrer que l'Exploitation à Faible Impact (ou RIL pour Reduced Impact Logging), définie comme « une récolte de bois intensivement planifiée et soigneusement contrôlée menée par des travailleurs formés de manière à minimiser les impacts délétères de l'exploitation forestière » (FAO, 2004), permettait de réduire de 50 % les pertes de CA liées à l'exploitation forestière sélective (pour le bois d'œuvre) réalisée sur le territoire (Derroire et al., 2021).

En 2015, l'ONF a mené une étude en collaboration avec INRAe, l'UMR 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 (régulation du climat, cycle des nutriments, production de biomasse, etc.) (INRAe, 2015).

En particulier, les auteurs ont testé l'effet d'une coupe rase sur le site de Saint-Elie et d'une « exploitation dirigée » sur le site de Risquetout. Cette dernière correspondait à des méthodes de réduction de l'impact de l'exploitation forestière, assistée par l'ONF, sans pour autant pouvoir être assimilée à de l'Exploitation à Faible Impact (Tableau Erreur ! **Signet non défini.**). Plusieurs indicateurs physico-chimiques et biologiques du sol ont été mesurés, dont la teneur en COS dans les horizons très superficiels, à 10 cm de profondeur. Les mesures ont été faites 40 ans après la coupe rase à Saint-Elie et 2 mois et 4 ans après l'exploitation à Risquetout.

Site	Risquetout	Saint-Elie
Dispositifs testés	1 parcelle témoin (non exploitée)	1 parcelle témoin (non exploitée)
	1 parcelle Exploitation dirigée (ED) : 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)	1 parcelle coupe rase
	1 parcelle Exploitation non dirigée (EN) : exploitation selon les mêmes consignes mais sans marquage ni assistance sur le terrain (pas d'implication de l'ONF)	
Intensité de l'exploitation	Exploitation réalisée en 2011. Prélèvement maximum d'environ 40 tiges/ha (100 m ³ /ha soit 30 à 50 % de la surface terrière).	Coupe rase réalisée en 1976 par abattage et débardage de tous les arbres (à l'exception des Chrysobalanacées, abattues et laissées sur place car jugées à l'époque inaptes à la production de pâte à papier)

Tableau Erreur ! Signet non défini. : Descriptif des parcelles testées sur les deux sites de Risquetout et de Saint-Elie (ONF, 2011 ; INRAe, 2015)

NB : Le matériel utilisé en parcelle ED et EN était identique

5.1.1. Effets de l'exploitation dirigée et non dirigée : résultats à Risquetout

Dans la parcelle ED, les résultats de mesures de teneur en carbone ont montré une diminution de 15 % en 4 ans, principalement expliquée 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).

Aucune différence n'a été observée en revanche entre le sol de la parcelle EN et celui de la parcelle témoin. Selon l'étude, l'exploitation non dirigée a en effet plutôt contribué à la création de conditions anaérobiques dans le sol liées au compactage après passages non contrôlés des engins forestiers. En plus de bouleverser la structure de la communauté microbienne du sol, ce phénomène a également rendu le COS inaccessible aux organismes aérobies, impactant en cascade la biomasse microbienne du sol (perte de 25 %) et donc finalement les capacités de minéralisation du carbone également.

Contrairement aux résultats attendus, cette étude n'a pas permis de conclure positivement sur l'effet de l'exploitation dirigée et assistée par l'ONF, qui aurait pu participer à la limitation des dégâts liés à l'exploitation forestière. Les mesures réalisées seulement 4 ans après exploitation ne permettent ainsi pas réellement de conclure sur l'effet à moyen/long terme des deux modes d'exploitation. De plus, elles concernent des teneurs en C, ce qui ne permet pas d'évaluer non plus de manière certaine le devenir des stocks de COS, d'autant plus que l'exploitation non dirigée entraîne un fort taux de tassement du sol.

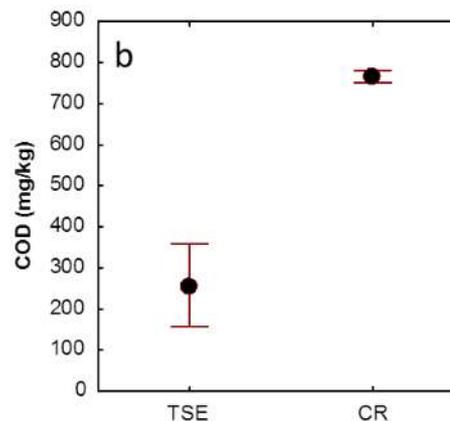
De manière générale, l'Exploitation à Faible Impact s'accompagne aussi de pratiques pour limiter le tassement du sol, comme des tapis de végétation laissés au sol, mais surtout de l'utilisation d'engins à chenilles pour limiter la pression au sol (Demenois et al., 2014). Cela aurait peut-être permis d'observer une différenciation entre les deux modes d'exploitation, mais reste à démontrer.

5.1.2. Effets de la coupe rase : résultats à Saint-Elie

Sur la parcelle de Saint-Elie ayant subi une coupe rase 40 ans auparavant, une augmentation importante de la teneur en COS par rapport à la forêt témoin est observée. Les auteurs concluent que la coupe rase permet un apport en matière organique issue des racines mortes et de la litière (les feuilles mortes, les petites branches, etc.). L'apport massif de matière organique contribue également à augmenter la biomasse microbienne du sol.

Figure 40 : Teneur en Carbone Organique Dissous (COD)¹⁶ à 0-10 cm sur le site de Saint-Elie (INRAe, 2015)

TSE : Témoin Saint-Elie ; CR : Coupe Rase



Indépendamment de l'exportation de la totalité du carbone aérien (soit environ 150 tC/ha) et en cohérence avec les résultats du projet CARPAGG, les auteurs 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 COS, elle pourrait être à l'origine d'une perturbation de la capacité de l'écosystème à fournir des nutriments azotés à la végétation et ainsi de la fixation du CO₂ par photosynthèse.

5.2. Effet des pratiques liées à la défriche agricole

5.2.1. La défriche traditionnelle et 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 peuvent être également débités à la machette. La parcelle est ensuite brûlée (« abattis brulis ») (

Figure). 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 (

Figure). Les andains sont ensuite brûlés. Actuellement, la grande majorité des défriches sont mécanisées.

¹⁶ Le COD a été confondu dans cette étude avec le COS.



Figure 371 : Photographie d'une défriche traditionnelle (à gauche) et mécanisée (à droite) en Guyane

Dans les deux cas, la pratique de défriche en elle-même entraîne une perte de COS du sol. En effet, sans la végétation dont le réseau racinaire agit comme un filet maintenant la terre, les sols sont plus facilement lessivés et érodés. Il en résulte alors une perte de matière organique et des argiles et donc du COS par ruissellement, comme cela a été observé dans les études FCARPAGG et CarsGuy (Fujisaki et al., 2017 ; Blanfort et al., 2013).

La défriche mécanisée est sujette à une plus grande perte de sol et donc de COS à cause du décapage¹⁷, du tassement et ainsi de l'érosion¹⁸ causés par le passage des engins mécanisés, et les conséquences peuvent être visibles des décennies après la défriche (Chauvel et al., 1991 ; Veldkamp et al., 2020).

Il existe cependant des méthodes réduisant l'impact de la défriche sur le sol et les stocks de COS. Dans le cadre du projet GUYAFER (« gestion de la fertilité des sols en Guyane »), SOLICAZ et INRAe ont ainsi produit un document technique sur les différentes techniques de réduction de l'impact de la défriche agricole sur les sols (SOLICAZ/INRAe 2015).

5.2.2. La défriche sans brûlis

Le brûlis est une technique ancestrale utilisée en agriculture pour enrichir les sols en minéraux fertilisants. Depuis des années déjà, ses bénéfices agronomiques sont largement remis en question : acidification des sols, pertes de micro et macrofaune (Rossi et al., 2010), formation d'un sol nu exposé aux rayons solaires, etc.

Il existe en Guyane, et plus généralement en Amazonie, un intérêt croissant pour les méthodes de défriche sans brûlis. Ceci s'explique par l'articulation possible entre 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 (Fujisaki et al., 2017).

Plusieurs études ont étudié les effets bénéfiques possibles de cette technique appelée « chop-and-mulch » (« hacher et pailler ») par rapport au « slash-and-burn » (« couper et brûler »). Dans l'état brésilien du Para, Davidson et al. (2008) ont montré que la défriche avec brûlis

¹⁷ Le décapage est l'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.

¹⁸ En effet, le tassement réduit la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol, et en parallèle favorise le ruissellement et l'érosion des sols.

avait un bilan GES six fois supérieur à celui de la défriche sans brûlis, en raison de la combustion de la biomasse aérienne (21 t eqCO₂/ha libérés contre 3,6 t eqCO₂/ha sur 2 ans, soit 5,7 tC/ha et 1 tC/ha perdus respectivement)¹⁹. En revanche, 3 ans après la déforestation, aucune différence significative de stocks de COS n'a été observée sur les parcelles, avec des valeurs de 56,1 et de 52,9 tC/ha à 0-30 cm de profondeur respectivement.

Dans les observations de Fujisaki et al. (2017) (voir 4.1), le suivi de la quantité et de la qualité des débris de bois apportés au sol lors de la défriche sans brûlis a permis de montrer que c'était bien l'apport massif de cette biomasse ligneuse qui était à l'origine d'une augmentation temporaire des stocks de COS (Fujisaki et al., 2015a). Or, 5 années après défriche, l'effet de cet apport n'était déjà plus observable.

En Guyane, Courte (2019) a simulé grâce au modèle RothC l'évolution des stocks de COS sous forêts à partir des données issues des bases de données GarsGuy et RMQS selon deux scénarios de défriche, avec et sans brûlis²⁰. 35 ans après la défriche, l'auteur n'observe également pas de différence significative sur les pertes de COS du sol entre les 2 scénarios à 0-30 cm de profondeur (Tableau 8).

Scénario de défrichement	Avec brûlis	Sans brûlis
Pertes de carbone du sol (tC/ha)	22,65	24,37

Tableau 8 : Pertes de COS entre les scénarios de défriche avec et sans brûlis à 0-30 cm de profondeur 35 ans après la défriche (Courte, 2019)

NB : les incertitudes ne sont pas fournies dans le document.

En résumé, les données produites en Guyane et en Amazonie brésilienne montrent que la défriche sans brûlis associée à une restitution de la biomasse ligneuse présente un bilan GES plus favorable que les pratiques de déforestation avec brûlis. En revanche, elle ne conduit pas à un stockage durable du carbone de la biomasse aérienne dans le sol.

5.3. Effet des pratiques agricoles

Les sols tropicaux sont, de manière générale, naturellement pauvres en éléments chimiques et donc en nutriments (Boyer, 1982 *in* Montaigne et al., 2018). Le climat à forte pluviométrie favorise l'érosion et le lessivage des éléments nutritifs, notamment en cas de perte du couvert forestier. De plus, l'activité agricole accentue ces phénomènes de perte de fertilité par l'exportation de matière dans les récoltes et des pratiques qui favorisent l'érosion (travail du sol répété, fertilisation chimique non raisonnée, etc.).

L'étude menée par INRAe et le bureau d'études SOLICAZ dans le cadre du projet GUYAFER (Cadre 9) a permis de faire un certain nombre de recommandations sur les pratiques agricoles

¹⁹ L'État brésilien du Para est recouvert de pâturages, de forêts primaires exploitées et de forêts secondaires, forêts ayant déjà été défrichées puis laissées à la repousse. Ces forêts ont des stocks de biomasse aérienne moins importants que les forêts primaires intactes de Guyane. Ainsi, lors de la défriche, la quantité de carbone aérien perdue y est moindre.

²⁰ Les deux scénarios comprenaient également un broyage du sous-bois forestier restituant au sol 11,2 tC/ha, une plante de couverture implantée pendant un an et fauchée avec restitution intégrale de la biomasse ainsi qu'un système de cultures annuelles mis en place avec restitution intégrale des résidus de culture au sol.

favorisant la fertilité des sols (SOLICAZ, 2015 ; Montaigne et al., 2018). Le BRF, le charbon de bois, le compost et les plantes de service ont ainsi été testés. Dans cette étude, ce sont des indicateurs biologiques représentatifs de la qualité des sols qui ont été mesurés (respiration microbienne, dénitrification, etc). Bien qu'ils donnent une idée sur la dynamique du cycle du carbone, aucune mesure de stock de carbone dans le sol n'a été faite. D'autres travaux ont permis de conclure sur l'effet de certaines pratiques agricoles sur les stocks de COS.

Cadre 9 : Le projet GUYAFER

Dans le cadre du programme RITA (Réseaux d'Innovation et de Transfert Agricole dans les outre-mer), le projet GUYAFER (« Gestion de la Fertilité des sols ») a été initié en Guyane en 2011. Les résultats ont donné lieu à la création d'une plaquette de communication à destination du grand public (SOLICAZ, 2015), ainsi qu'à un rapport technique produit par ce bureau d'études (Montaigne et al., 2018). Depuis, SOLICAZ a produit d'autres rapports. Ils constituent un ensemble de guides de la fertilité organique en Guyane.

5.3.1. L'agriculture à faible impact

Dans le cadre du projet CarsGuy, les pratiques agricoles favorables au stockage de C 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 (Tableau 9). En particulier, les auteurs ont défini des systèmes à « faible impact » comme des « systèmes de production efficaces au niveau économique et environnemental (d'un point de vue du carbone et des émissions de GES) », avec notamment l'emploi de pratiques agricoles, mais aussi de défriche, ayant un faible impact environnemental.

	Systèmes à faible impact (20 parcelles)	Systèmes à forts intrants (5 parcelles)	Systèmes traditionnels (6 parcelles)
Pratiques utilisées	<ul style="list-style-type: none"> - Exploitations en agriculture biologique - Polyculture élevage - Maraîchage et arboriculture - Travail du sol manuel - Peu d'intrants de synthèse - Techniques agroécologiques (BRF issus de la défriche, amendements organiques, rotations, couvert végétal) 	<ul style="list-style-type: none"> - Exploitations mécanisées - Recours systématique aux intrants chimiques et organiques - Maraîchage et arboriculture monospécifiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Implantés de façon informelle - Abattis-brûlis en itinérance - Agriculture vivrière traditionnelle - Abandon progressif des parcelles

Tableau 9 : Résumé des caractéristiques de la typologie des exploitations testées dans Courte, 2019 et Courte et al., 2020

L'auteur met en évidence l'effet de ces différentes pratiques sur les pertes et l'évolution des stocks de COS après défriche (Figure 42).

Concernant les pratiques à faible impact, on observe deux sous-groupes pour lesquels deux tendances semblent se détacher :

- Tendance a : une forte augmentation après un gain à la suite de la défriche (jusqu'à 30 tC/ha 2 ans après)

Dans les trois quarts des cas s'opère un accroissement rapide et conséquent du niveau de COS par rapport à la situation à T_0 (défriche). Dans l'ensemble, l'effet des buttes ou des terrasses permet un accroissement considérable des stocks (entre 15 et 62 %) sur 50 cm de sol et ce en un laps de temps très court (moins de 5 ans). Ceci est dû à des apports de grandes quantités de matière végétale fraîche (BRF ou paillis) pour constituer les planches de culture qui, en se décomposant, rehaussent les stocks de COS. Les travaux de Fujisaki et al. (2015) et Perrin et al. (2014) ont montré le rôle conservatoire de ces mulchs à court terme, ce qui va dans le sens de nos observations. Toutefois, ces effets sur les stocks ne sont pas pérennes lors de la disparition des fragments de bois, ce qui apparaît inéluctable dans les conditions climatiques qui prévalent actuellement.

- Tendance b : une lente augmentation après une faible perte de COS à la suite de la défriche (environ 10 tC/ha perdus 3 ans après la défriche)

Dans un quart des cas, les stocks ont diminué à la suite de la défriche et de la mise en culture, mais les stocks de COS sont dans une dynamique de croissance lente et semblent se stabiliser au bout de 15 ans, voire dépasser les niveaux de COS initiaux. Ici, le compartiment d'entrée du carbone est alimenté fortement lors de la défriche, ce qui implique que le stock initial soit peu impacté. L'apport de matière organique est souvent, dans ces cas, réduit à des débris de fauche, la décomposition des racines et de la biomasse aérienne des plantes cultivées laissées sur le sol, voire des composts ou fumiers. Ces apports sont difficilement chiffrables car issus de différentes sources, dans des quantités et qualités variables, et pas suffisamment étudiés.

Les systèmes à forts intrants ne montrent, quant à eux, pas de tendances d'évolution. En revanche, ils sont marqués par une importante perte de COS à la suite de la défriche (entre 20 et 60 % perdus entre 2 et 6 ans après la défriche).

Pour les systèmes traditionnels, les stocks mesurés sont très variables, avec -30 à +13 % par rapport aux stocks initiaux 30 ans après la défriche.

Les exploitations à faible impact utilisent des techniques de défriche et agricoles favorables à l'enrichissement plus ou moins rapide et à la retenue de carbone dans le sol : défriche sans brûlis, apports réguliers de BRF et de paillis, débris de fauche, formation de buttes et de terrasses. Dans les exploitations des systèmes à forts intrants, l'utilisation d'intrants chimiques accompagnée de modes de défriche mécanisés avec brûlis des andains entraîne de fortes pertes et ne permet pas de reconstituer les stocks initiaux. Dans les systèmes traditionnels, le manque d'apports de matière organique joue incontestablement sur les pertes 30 ans après la défriche (Courte, 2019).

Le schéma expérimental mis en place par l'auteur ne permet pas de distinguer les effets bénéfiques des pratiques de défriche et agricoles. Aussi ne permet-il pas de conclure sur l'effet individuel des différentes pratiques utilisées. En revanche, il démontre l'intérêt de l'utilisation des pratiques à faible impact sur le COS. Finalement, l'auteur conclut de ses travaux que trois éléments influencent l'évolution des stocks de COS lors d'un passage de l'agriculture à la forêt : les stocks de COS sous forêts, les pratiques de défriche et les pratiques agricoles.

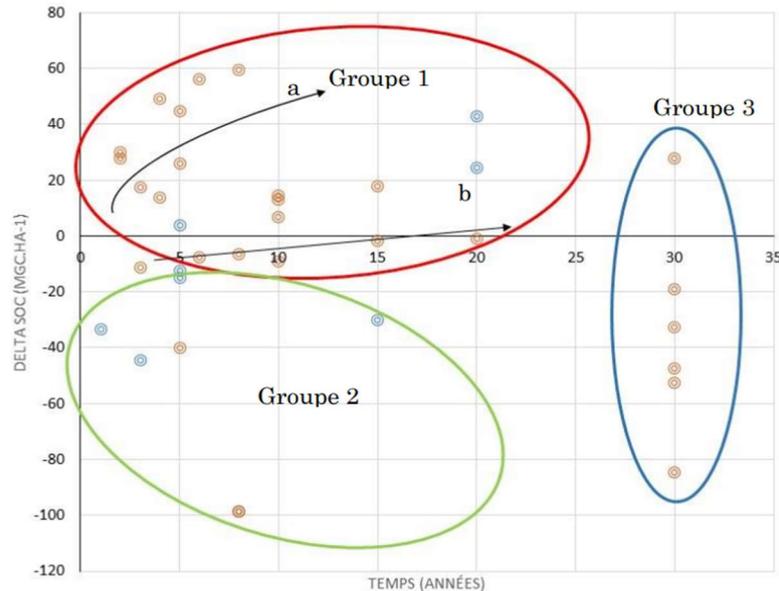


Figure 42 : Différence entre stocks de COS forestiers et agricoles en fonction de l'âge de la parcelle (Courte, 2019)

Les parcelles ont été classées en trois groupes : Groupe 1 = systèmes à faible impact ; Groupe 2 = systèmes à forts intrants ; Groupe 3 = systèmes traditionnels

5.3.2. L'ajout de litière aérienne

L'ajout de matière organique dans le sol est l'une des pratiques « phares » de l'agriculture à faible impact. Des débris végétaux (mauvaises herbes coupées) et des fumiers issus de l'élevage peuvent par exemple être utilisés éventuellement avant une étape de compostage.

Il est souvent considéré que cet apport de matière organique, décomposée par les micro-organismes du sol, permet un enrichissement en C 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), remettant en question l'effet général de l'apport de matière organique fraîche sur les stocks de COS. Un certain nombre de travaux réalisés à travers le monde suggèrent que la litière aérienne²¹ apportée serait rapidement minéralisée et ne participerait pas au stockage à long terme du C dans le sol.

En Guyane, l'effet de l'apport de litière aérienne sur le sol a été étudié à travers en contexte forestier. Une étude menée sur le site de Paracou a montré qu'elle menait à la multiplication par 2 du carbone microbien du sol (constitutif du COS), mais également par 10 de la respiration microbienne (Soong et al., 2018)²². Les analyses isotopiques ont permis d'affirmer que le carbone minéralisé lors de la respiration était issu de la litière.

Ce phénomène s'appelle le « priming effect ». Il décrit le fait que les apports de matière organique fraîche stimulent la respiration microbienne de manière « anormale ». Les micro-

²¹ On distingue les litières aériennes, issues de la chute de la biomasse aérienne, des litières souterraines (ou racinaires), issues du début de décomposition des racines. Contrairement aux litières aériennes, les litières souterraines participent à l'enrichissement à long terme du C dans le sol, comme l'on montré les travaux réalisés dans le cadre du projet CARPAGG.

²² Expérience réalisée en laboratoire en Belgique avec du sol et de la litière de Paracou.

organismes se multiplient, ce qui contribue à une augmentation du COS. Cette augmentation est cependant momentanée, puisque le C contenu dans la biomasse microbienne fait partie du compartiment labile, facilement minéralisable et ayant un temps de séjour dans le sol de l'ordre de l'année maximum (Figure).

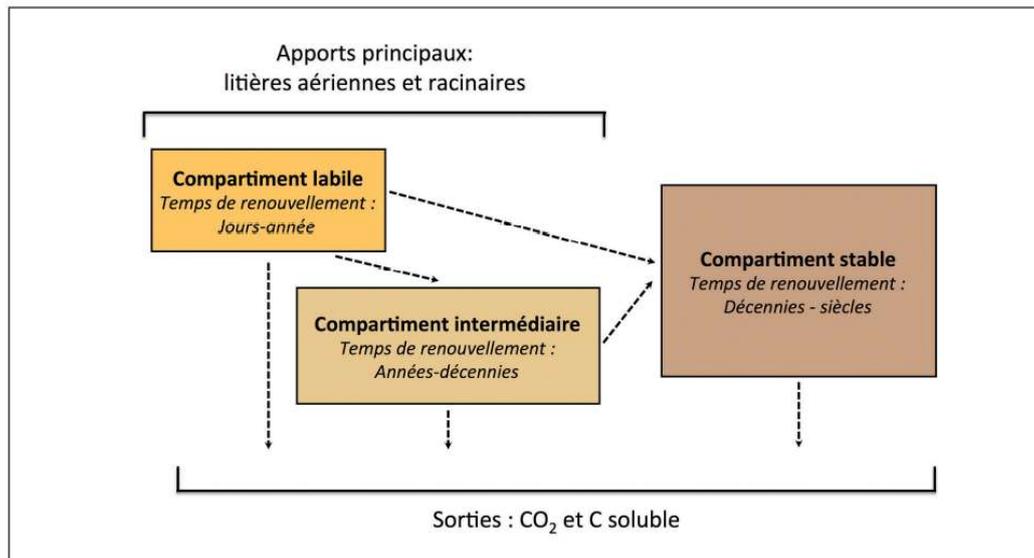


Figure 43 : Flux de C entre les différents compartiments conceptuels de C du sol lors de l'ajout de litières aériennes et racinaires (Derrien et al., 2016)

5.3.3. L'utilisation de plantes fixatrices d'azote

Ce priming effect dépend de la qualité des litières, caractérisée notamment par leur proportion en lignine, ainsi que le ratio lignine/azote (N). Bréchet et al. (2017) ont étudié l'impact de certaines variables liées aux conditions du milieu en forêt tropicale humide sur la respiration des micro-organismes décomposeurs de matière organique. Pour cela, ils ont utilisé le modèle Century (voir cadre 4) paramétré avec les données du site de Paracou.

Les auteurs concluent que la qualité chimique des litières, ainsi que l'humidité du sol, affectent la variabilité spatiale des flux de CO₂ : plus les espèces végétales à l'origine des litières sont riches en lignine, et plus la respiration des micro-organismes est faible. Fanin et al., 2011, tirent la même conclusion avec des mesures réelles de respiration microbienne sur 225 prélèvements de litière et de sol en Guyane.

Sans mesures de COS, les travaux cités ne peuvent conclure sur l'effet de la qualité des litières aériennes sur l'enrichissement ou non en COS. D'après la littérature, il est cependant couramment admis que des teneurs élevées en lignine dans les litières augmentent les entrées de C vers le compartiment « intermédiaire », c'est-à-dire moyennement stable (Figure 43) (Derrien et al., 2017).

Il est également admis que de fortes teneurs en N accélèrent la cinétique initiale de décomposition des résidus végétaux. En parallèle, elles mènent aussi à une inhibition de la décomposition des lignines (Derrien et al., 2017).

A moyen terme, Martins et Angers (2015) ont montré, grâce à la construction d'un modèle, que l'apport de litières faites à partir de légumineuses, plantes riches en composés azotés et en lignine, conduisait à une augmentation du stock de C organique dans les sols selon deux mécanismes. En premier lieu, les composés azotés stimulent l'activité microbienne. Il en

résulte une accumulation de résidus microbiens. En second lieu, les composés ligneux sont lentement dégradés (Cotrufo et al., 2015, *in* Derrien et al., 2017).

En Guyane, des tests sont actuellement en cours dans le cadre du projet Carbiosol (Cadre 7). Les premiers résultats montrent que l'efficacité d'utilisation du C par les micro-organismes (traduite par le ratio entre le CO₂ dégagé par la respiration lors de la minéralisation et la biomasse microbienne) est nettement meilleure en zone revégétalisée avec des plantes fixatrices d'azote (produisant des litières riches en azote) qu'en forêt.

Ces résultats, bien qu'observés sur d'anciennes parcelles minières en voie de revégétalisation, sont une avancée importante dans la connaissance des pratiques agricoles favorisant un stockage du C à long terme dans le sol. Ils montrent encore une fois l'intérêt de l'utilisation des plantes fixatrices d'azote dans : 1) L'enrichissement naturel en N dans le sol et 2) L'enrichissement en C à long terme.

5.3.4. Le BRF

Le Bois Raméal Fragmenté (BRF) désigne un amendement organique composé de copeaux de bois obtenus par broyage de rameaux (Figure). Sa qualité se traduit par son rapport C/N : plus il est élevé, plus la décomposition du BRF est lente. En se décomposant, le BRF apporte de la matière organique au sol. Grâce à sa biomasse relativement riche en lignine, il évolue progressivement en humus stable et apporte un certain nombre d'avantages : meilleure stabilité structurale du sol, porosité, perméabilité de la litière et rétention d'eau. Il bloque cependant plus longtemps les nutriments dans les grosses molécules organiques du sol (Roose, 2017).



Figure 44 : Photographie de BRF (SOLICAZ, 2015)

NB : Il est recommandé d'apporter une épaisseur de 4 à 8 cm d'un broyat grossier de branches d'espèces arborescentes de diamètre inférieur à 7 cm sur le sol avant l'installation de la culture (SOLICAZ, 2015)

Le BRF est un amendement utilisé en Guyane. Dans les pratiques de défriche sans brûlis, les rameaux de bois peuvent en effet être valorisés en BRF. Son effet sur le sol a été étudié au cours des travaux précédemment cités (Courte, 2019). Grâce au modèle RothC, l'auteur a modélisé l'impact de l'ajout de BRF sur l'évolution des stocks de COS dans le temps dans un système à forts intrants après une défriche sans brûlis et utilisation d'un BRF (Figure , en bleu) et un système à faible impact avec un apport de BRF ou de paillis tous les 2 ans (Figure , en orange).

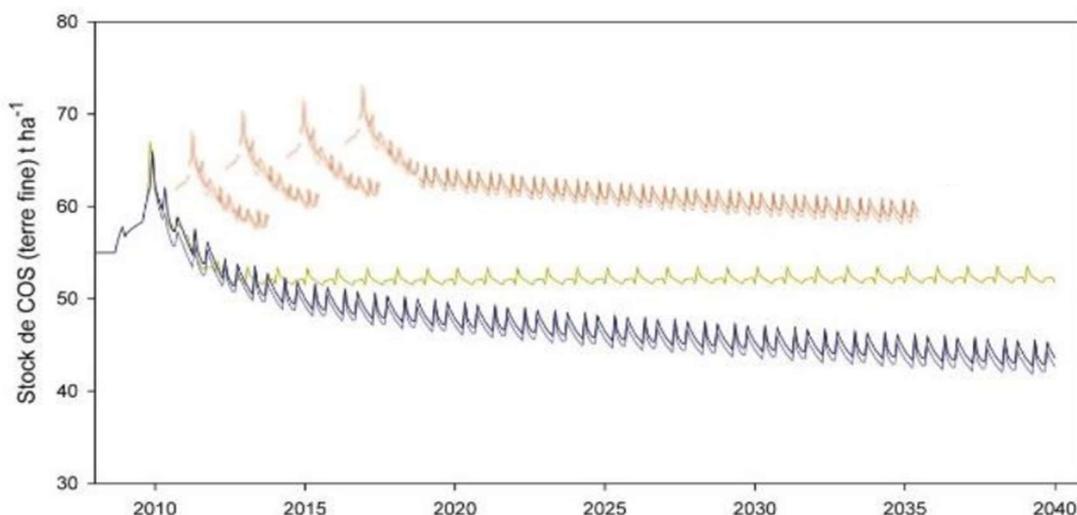


Figure 45 : Modélisation des évolutions du COS dans le temps pour deux systèmes après apport de Bois Raméal Fragmenté et sous prairie après défriche (Courte, 2019)

Courbe bleue : système à forts intrants après défriche sans brûlis et utilisation d'un BRF
 Courbe orange : système à faible impact avec apport de BRF ou de paillis tous les deux ans
 Courbe verte : prairie après défriche

Les résultats montrent que l'ajout de BRF entraîne une augmentation rapide du COS avant que celui-ci ne chute. Riche en lignine, le BRF devrait permettre d'enrichir le compartiment de C du sol moyennement minéralisable. Or on observe une chute du COS dès un an après l'apport.

Ainsi, le BRF se révèle être une matière intéressante pour réhausser les stocks de COS sous réserve d'un apport régulier pour en bénéficier durablement. Lors des mesures de stocks de COS des exploitations pratiquant une agriculture à faible impact précédemment citées (voir 5.3.1), Courte (2019) a ainsi observé que les stocks les plus élevés (425,33 tC/ha pour l'horizon 0-50 cm²³) correspondaient à des parcelles dont la défriche était récente et pour lesquelles il a également été utilisé le BRF issu des bois de défriche²⁴.

²³ Dans cette étude, les parcelles correspondaient également à des parcelles à hautes valeurs de stock de carbone avant défrichement (Courte et al., 2019).

²⁴ Lors de l'utilisation de matière issue d'une défriche forestière comme le BRF, il faut être vigilant sur les phénomènes de « transferts ». En effet, augmenter les stocks de carbone ou augmenter la fertilité via l'introduction de BRF dans une parcelle agricole, c'est potentiellement diminuer les stocks et la fertilité des parcelles forestières voisines à l'origine de la fabrication du BRF utilisé. Courte (2019) discute ainsi de la durabilité de cette pratique, et considère que le transfert doit être pris en compte dans les bilans carbone ou GES.

5.3.5. Le travail du sol

L'étude « 4p1000 métropole » a mis en avant les résultats contrastés issus de la littérature relatifs aux effets du labour sur le stockage de C dans les sols. Les études avaient montré que la conversion d'un système avec labour en un système reposant sur le semis direct strict pouvait entraîner une augmentation du stock de C dans l'horizon 0-30 cm²⁵. Elles mettaient également en avant que cet effet semblait plus important en climat sec (semi-aride à aride) qu'en climat tempéré humide, sous lequel le stockage additionnel était très peu important (Pellerin et al., 2020).

En Guyane, la pratique a été testée par Fujisaki et al. (2017) précédemment cités. Les auteurs n'ont pas étudié la transition entre un système avec labour et un système reposant sur le semis direct mais bien la différence entre deux systèmes avec et sans labour. Les auteurs ont montré qu'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, confirmant les observations faites en métropole.

²⁵ Les auteurs des travaux réalisés dans le cadre de l'étude « 4p1000 métropole » ont également noté avec étonnement qu'il n'existait aucune relation significative entre le stockage dans l'horizon 0-30 cm après l'abandon du labour et la durée de l'expérimentation, alors qu'une relation linéaire était attendue.

Bibliographie

- Allié, E., Péliissier, 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 Vincent, Assouma Mohamed Habibou, Bois Bérénice, Edouard-Rambaut Louis-Axel, Vayssières Jonathan, Vigne Mathieu. 2022. L'efficiance pour rendre compte de la complexité des contributions des systèmes d'élevage au pâturage au changement climatique. In : Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux. Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses. Ickowicz Alexandre (ed.), Moulin Charles-Henri (ed.). Versailles : Ed. Quae, 86-104.
- 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)
- Commissariat général au développement durable, 2018. Environnement & agriculture, Les chiffres clés, édition 2018.
- 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., Blanfort, 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.
- Derrien, D., Dignac, M. F., Basile-Doelsch, I., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Freschet, G. T., Garnier, P., Guenet, B., Hedde, M., Klumpp, K., Lashermes, G., Maron, P. A., Nunan, N. Roumet, C., & Barré, P., 2016. Stocker du C dans les sols : quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ? Etude et Gestion des Sols, volume 23.
- 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.
- 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., 2015. Diversité des écosystèmes forestiers de Guyane française : distribution, déterminants et conséquences en termes de services écosystémiques. Thèse, Université de Montpellier
- 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., Pélissier, R., Brunaux, O., Jaouen, G., Sabatier, D., 2015b, 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., non publié. 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
- 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
- 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 \(audeg.fr\)](#)
- 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.

- 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., 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>
- 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. [ff10.1016/j.agee.2009.08.012](https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.08.012)ff. [ffhal-00493992f](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 ; <https://www.solicaz.fr/wp-content/uploads/Guide-de-la-fertilite-organique-en-Guyane-2015-VF.pdf>
- Soong, J.L., Marañon-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>