



HAL
open science

Synthèse biophysique sur le stockage de carbone dans la biomasse aérienne en 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 la biomasse aérienne en en Guyane. CIRAD; INRAE; IRD. 2023. hal-04130265

HAL Id: hal-04130265

<https://hal.inrae.fr/hal-04130265v1>

Submitted on 15 Jun 2023

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

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

RAPPORT
FINAL

mars 2023



STOCKER DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICILES ET FORESTIERS ULTRAMARINS



*Synthèse biophysique sur le stockage
de carbone dans la biomasse aérienne
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, Bruno Hérault, 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, DERROIRE Géraldine, BLANFORT Vincent, ROGGY Jean-Christophe, DEMENOIS Julien, TESTE Adrien, HERAULT Bruno, ALBRECHT Alain, BLAZY Jean Marc, FUJISAKI Kenji, AVADI Angel, BRECHET Laëtitia, BROSSARD Michel, BURBAN Benoit, CHEVALLIER Tiphaine, CHOTTE Jean-Luc, DOREL Marc, FEDER Frédéric, FERNANDES Paula, FREYCON Vincent, 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 la biomasse aérienne en Guyane - version finale – mars 2023 – dans « 4 pour 1 000 » *Outremer : 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, 83 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 le présent rapport.

D'après la FAO, le C contenu dans la biomasse forestière de Guyane se répartit en moyenne de la façon suivante : 30 % dans le sol, 52 % dans la biomasse vivante aérienne, 13 % dans la biomasse vivante souterraine (racines), 4 % dans le bois mort et 1 % dans la litière (FAO, 2020). Parmi ces trois derniers compartiments, la biomasse vivante aérienne est le compartiment le plus étudié pour décrire le carbone stocké dans les forêts. C'est en effet le plus accessible. Il est aussi immédiatement affecté par la dégradation des forêts et la déforestation.

Après avoir présenté une estimation des stocks de carbone aérien (CA) sur le territoire, ce rapport fait état des connaissances sur les principaux déterminants de la variabilité spatiale et temporelle de ces stocks. Il expose ensuite l'effet des changements d'usage des sols ainsi que des pratiques de gestion forestière. Il a été construit à l'aide de références bibliographiques et d'entretiens réalisés avec différents experts spécialisés.

Certains phénomènes indirectement liés aux stocks de CA sont également mis en lumière et leur compréhension est primordiale pour l'évaluation des politiques publiques d'aménagement

du territoire. Ils sont détaillés dans des annexes, auxquelles il est fait référence dans le document.

Les études recensées en Guyane permettent de dire que le territoire, recouvert par 8,1 millions d'hectares de forêt, compte environ 1,32 milliards de tonnes de carbone contenues dans la biomasse aérienne. La variabilité est importante, avec des stocks allant de 75 à 250 tC/ha. Les forêts des montagnes et des plateaux au centre concentrent plus de carbone à l'hectare que celles des plaines côtières et des dépressions au nord et au sud.

La texture du sol permet d'expliquer la dynamique forestière en termes de vitesse de croissance et de mortalité des arbres, mais n'est pas à l'origine d'une variation des stocks CA. En revanche, la topographie est un facteur de variabilité. En effet, les bas-fonds sont sujets à l'engorgement en eau, ce qui favorise l'apparition de chablis et l'ouverture de la canopée à l'origine de la mise en place d'arbres à faible densité de bois. Enfin, la diversité des espèces floristiques a été observée comme un facteur positivement corrélé aux stocks de CA. En Guyane, cette observation serait davantage expliquée par un contexte climatique et géomorphique stable à l'origine du maintien d'un grand nombre d'espèces, mais aussi de la mise en place de Ferralsols profonds et très argileux favorables au développement de fortes biomasses aériennes.

A l'échelle des années et en Guyane spécifiquement, le changement climatique pourrait causer des pertes de 3,5 à 5 tC/ha contenues dans la biomasse aérienne forestière, soit 28 à 40,5 millions de tC au total. Aussi serait-il à l'origine d'un allongement des temps de régénération de la biomasse après coupe, perturbant fortement les stratégies d'exploitation forestière.

L'extension de l'agriculture est la première cause de changement d'usage des sols en Guyane. A l'échelle de la parcelle, elle entraîne la perte de la (quasi) totalité du carbone aérien forestier. Un fort enjeu existe sur la valorisation de cette biomasse aérienne, en bois d'œuvre ou en production d'énergie par exemple, cette dernière voie ayant fait l'objet de plusieurs études de bilan C et GES en Guyane. Ainsi, les défriches agricoles avec valorisation de la biomasse aérienne en production d'énergie permettraient de réduire de 30 % le bilan GES et C.

La mise en eau du barrage de Petit-Saut représente également un changement d'usage des sols notable dans l'histoire de la Guyane. Elle a engendré l'immersion de 10 millions de tonnes de carbone contenues dans la biomasse forestière et dans le sol. Si la moitié du COS a déjà été perdue jusqu'à aujourd'hui par des phénomènes de dégradation de la matière en milieu anoxique, les scientifiques estiment que seuls 20 % de la biomasse aérienne se sont dégradés. En effet, elle est constituée d'une importante part de matière très difficilement dégradable (les troncs).

L'exploitation forestière est à l'origine d'importantes pertes de CA. Ces pertes sont dues à l'exploitation en elle-même et aux dégâts indirectement causés par l'activité. Il est ainsi nécessaire de mettre en place des stratégies permettant de réduire cet impact. Entre autres, l'utilisation de techniques d'exploitation à faible impact peut réduire de 50 % les dommages sur les stocks de carbone aérien de la forêt. En outre, l'exploitation intensive sur de faibles surfaces est une meilleure stratégie pour réduire le bilan C par rapport à une exploitation modérée sur de grandes surfaces. Enfin, l'exploitation de forêt naturelle telle qu'actuellement pratiquée en Guyane, complétée de l'exploitation de plantations d'arbres mises en place afin d'augmenter la récolte, ainsi que d'une valorisation des déchets pour la production d'énergie, serait le meilleur scénario permettant à la Guyane d'assurer un approvisionnement durable en bois tout en limitant l'impact sur les stocks de CA.

Table des matières

Table des matières.....	5
Table des figures.....	7
Table des tableaux.....	9
Lexique.....	10
Acronymes.....	11
1. Contexte biophysique de la Guyane.....	12
1.1. Situation géographique et topographie.....	12
1.2. Climat.....	13
1.3. Géologie.....	15
1.4. Géomorphologie.....	15
1.5. Occupation des sols.....	16
1.5.1. Les forêts.....	18
1.5.2. Les mangroves.....	20
1.5.3. Les zones agricoles.....	22
1.5.4. Les zones aurifères.....	23
1.5.5. Les savanes.....	24
1.6. Changement d'occupation des sols.....	24
1.7. Typologie des sols.....	24
2. Quels sont les stocks de carbone aérien ?.....	25
2.1. Comment évaluer les stocks de carbone aérien ?.....	25
2.2. Les stocks de carbone aérien évalués en Guyane.....	27
2.2.1. Sur l'ensemble du territoire.....	27
.....	28
2.2.2. Par habitat forestier.....	28
2.3. Les modèles d'évaluation du carbone aérien : sources d'incertitudes et d'imprécisions.....	30
2.4. Le cas des mangroves.....	31
3. Quels sont les principaux déterminants des stocks de carbone aérien ?.....	32
3.1. Quels sont les déterminants de la variabilité spatiale ?.....	33
3.1.1. La texture du sol.....	34
3.1.2. La topographie.....	36
3.1.3. La diversité des espèces floristiques.....	36
3.1.4. L'abondance en lianes.....	38
3.2. Quelles sont les sources de variabilité temporelle des stocks de C ?.....	40
3.2.1. Variabilité intra et inter-annuelle.....	40
3.2.2. Effets de la sécheresse.....	41

3.2.3. Effet de l'augmentation des précipitations et des températures	42
3.2.4. Modélisations de l'effet du changement climatique sur le CA	43
4. Effets des changements/maintien d'usage des sols sur les stocks de carbone aérien.....	47
4.1. De la forêt vers les zones humides : le cas du barrage de Petit-Saut.....	47
4.2. De la forêt vers l'agriculture.....	48
4.3. Autres changements d'usage.....	49
5. Effets des changements/maintien des pratiques forestières sur les stocks de carbone aérien	50
5.1. Effets de l'intensité de l'exploitation forestière.....	51
5.2. Effet de l'Exploitation à Faible Impact	52
5.3. Land sharing vs land sparing	53
5.4. Le choix de la forêt exploitée.....	54
5.5. Quel meilleur scénario d'exploitation forestière en Guyane pour le maintien des stocks de carbone aérien ? Le projet GFCLim	55
Bibliographie	57
Annexe 1 : La forêt, puits ou source de carbone ?.....	66
Annexe 2 : Bilan des émissions de Gaz à Effet de Serre.....	69
1. <i>Bilan GES de la forêt</i>	70
1.1. <i>Émissions de CO₂, CH₄ et N₂O par les sols des forêts</i>	70
1.2. <i>Emissions de CH₄ et N₂O par les troncs des arbres</i>	71
2. <i>Bilan GES du passage de la forêt à l'agriculture</i>	71
2.1. <i>Défriche avec brûlis</i>	71
2.2. <i>Défriche sans brûlis avec valorisation énergétique de la biomasse</i>	73
2.3. <i>Défriche sans brûlis suivie de la mise en place d'agroécosystèmes</i>	74
3. <i>Bilan GES du barrage de Petit-Saut</i>	76
3.1. <i>Mécanismes d'émission</i>	77
3.2. <i>Evolution des émissions depuis la mise en eau</i>	79
4. <i>Bilan GES de diverses activités agricoles</i>	80
4.1. <i>La production bovine</i>	80
4.2. <i>Les systèmes herbagers à l'échelle de la parcelle</i>	82
4.3. <i>Arboriculture et maraîchage</i>	82
Bibliographie	84

Table des figures

Figure 1 : Carte de localisation de la Guyane française (source : Google maps).....	12
Figure 2 : Carte topographique de la Guyane française (IRD, 1979)	12
Figure 3 : Températures moyennes mensuelles en Guyane sur l'année 2021,.....	13
exprimées en °C (Météo France).....	13
Figure 4 : Histogramme de pluviométrie mensuelle sur l'année 2021 (Météo France).....	13
Figure 5 : Températures moyennes annuelles de 1955 à 2021, exprimées en °C	14
(Météo France).....	14
Figure 6 : Précipitations annuelles de 1967 à 2021 (Météo France, 2022)	14
Figure 7 : Carte géologique simplifiée de la Guyane (Fayad, 2016).....	15
Figure 8 : Carte de répartition des paysages géomorphologiques (Guitet et al., 2013).....	16
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).....	17
Figure 10 : Diagrammes de l'occupation des sols en Guyane en 2012 (source : Observatoire du carbone, 2013)	18
Figure 11 : Carte d'occupation des sols de la côte guyanaise en 2015.....	18
(source : Geo.data.gov).....	18
Figure 12 : Carte de répartition des habitats forestiers de Guyane	19
(Guitet et al., 2015a, <i>in</i> ONF, 2015).....	19
Figure 13 : Occupation du sol sur le littoral guyanais en 2015 (ONF, 2017) et photographie d'une mangrove à palétuviers rouges (source : IRD).....	21
Figure 14 : Photographies d'une ancienne mangrove (à gauche) et d'une mangrove en installation (à droite) en Guyane (source : C. Proisy).....	21
Figure 15 : Photographie aérienne de mangroves guyanaises (source : C. Proisy).....	22
Figure 16 : Dynamique agricole en Guyane entre 1990 et 2012 (ONF Guyane – IGN, 2014, <i>in</i> Guyane Energie Climat, 2016)	22
Figure 17 : Evolution de la SAU totale des exploitations agricoles en Guyane entre 2011 et 2020 (source : DEAAF de Guyane, 2021)	23
Figure 19 : Changement d'usage des sols en Guyane de 1990 à 2012 (IGN, 2015, d'après Lefèbvre et Verger, 2014).....	24
Figure 20 : Répartition des types de sols sur le territoire guyanais par Guitet et al. (non publié)	25
Figure 21 : Schéma récapitulatif de la méthode employée pour estimer le carbone aérien forestier à l'échelle d'un territoire	27
Figure 22 : Carte de distribution de la biomasse vivante aérienne sur le territoire guyanais (Fayad, 2016).....	30
Figure 23 : Photographie aérienne de 4 mangroves d'âges différents (de la plus jeune à gauche à la plus vieille à droite) prises dans le secteur de Kaw (Proisy et al., 2007)	31
Figure 24 : Cartographie de biomasse des mangroves du site de Kaw (Proisy et al., 2007).32	
Figure 25 : Sites d'étude des travaux de Soong et al., 2020	34
Figure 26 : Schéma simplifié de l'influence des sols sur la croissance et la mortalité des arbres, mais pas sur la biomasse (Soong et al., 2020)	35
Figure 27 : Photographie aérienne d'un macro-chablis (5 km de long sur 50 ha) en 2010 entre Mana et Petit-Saut (source : ONF, d'après Image SPOT du 31/07/2010 KJ 688-339 fournie par SEAS-Guyane © CNES)	36
Figure 28 : Stocks de CA, COS et de C total en fonction de la biodiversité alpha_ (Guitet, 2015)	38
Figure 29 : Photographies aériennes et hauteur de la canopée des sites « forêt infestée de lianes » et « forêt à haute canopée » de l'étude de Tymen et al. (2015).....	39

Figure 30 : Vue microscopique d'une embolie dans un faisceau (source : Sécheresse et embolie gazeuse chez les arbres INRAE INSTIT)	41
Figure 31 : Biomasse aérienne forestière en fonction des températures annuelles moyennes et des précipitations annuelles (Hilner et al., 2021)	43
Figure 32 : Changement à long terme des stocks de carbone (aérien) dû aux seuls effets de la température pour une augmentation de la température de l'air à la surface du globe de 2°C (Sullivan et al., 2020).....	44
Figure 33 : Résultats de l'effet des 3 scénarios climatiques testés par Hiltner et al. (2021) pour une forêt non exploitée (à gauche) et exploitée (à droite).....	46
Figure 34 : Photographie de troncs submergés qui ne se sont pas décomposés dans la retenue du barrage de Petit-Saut (source : Ademe, Observatoire du Carbone).....	48
Figure 35 : Gisements de biomasse mobilisables en 2017, 2020, 2023 et 2030 exprimés en tonnes de bois par an selon les projections de l'Ademe (source : Biomasse L'Ademe en Guyane)	49
Figure 36 : Carte du domaine forestier permanent de Guyane et zones d'exploitation par période (Piponiot-Laroche et al., 2018).....	50
Figure 37 : Modélisation des différentes stratégies d'exploitation forestière à l'échelle de l'Amazonie (Piponiot et al., 2019)	54
Figure 38 : Bilan carbone cumulé sur la période 1974 - 2088 pour tous les scénarios du projet GFclim (Hérault et al., 2020).....	56

Table des tableaux

Tableau 1 : Descriptif des différentes familles d'habitats forestiers recensées.....	20
Tableau 2 : Récapitulatif des stocks de carbone aérien forestiers évalués sur l'ensemble du territoire guyanais.....	28
Tableau 3 : Récapitulatif des stocks de biomasse et de carbone aériens par hectare moyen en fonction des habitats forestiers définis par Guitet (2015)	29
Tableau 4 : Indicateurs mesurés par Tymen et al. (2015).....	397
Tableau 5 : Résultats de l'effet des 3 scénarios climatiques testés par Aubry et al. (2019)	442
Tableau 6 : Schéma expérimental utilisé par Blanc et al. (2009)	49
Tableau 7 : Temps de régénération de la biomasse forestière évalués par le modèle FORMIND sur la forêt du site de Paracou subissant 2 intensités d'exploitation forestière (Hiltner et al., 2018).....	520
Tableau 8 : Pertes médianes de carbone d'une exploitation de 30 m ³ /ha avec et sans RIL (Derroire et al., 2021)	531
Tableau 9 : Exemple de deux scénarios de développement de la filière bois, choisis et étudiés dans le cadre du projet GFclim (Hérault et al., 2020).....	553

Lexique

Allométrie : Relation entre les mesures de différentes parties d'un organisme. Une équation allométrique permet d'estimer une mesure en fonction d'une ou plusieurs autres (en l'occurrence la biomasse d'un arbre en fonction de sa taille).

Connexes d'exploitation : Arbres abattus ou abîmés lors de l'ouverture de pistes et lors de l'abattage, et ne faisant pas partie des arbres désignés par l'ONF dans le cadre de plans d'aménagement forestiers durables et devant être abattus.

Eclaircie : Opération de suppression des essences non commercialisables dans le but d'avantager les essences commercialisables (meilleur accès à la lumière, réduction de la compétition, etc.).

Epigée : Qui croît au-dessus du sol.

Exploitation à Faible Impact (RIL pour Reduced Impact Logging en anglais) : Ensemble de techniques permettant de réduire les dégâts causés par l'exploitation forestière sélective.

Extrapolation : Fait de généraliser à partir de données ponctuelles.

Grume : Morceau de tronc sorti de la forêt à destination de la scierie lors de l'exploitation forestière. Les grumes peuvent être revêtues ou non de leur écorce, mais ne présentent plus de houppier ni de branches.

LIDAR (pour Light Detection and Ranging en anglais) : Méthode de télédétection basée sur des ondes laser.

Pantropical : Relatif à l'ensemble de la zone tropicale.

Perturbation : Événement discret modifiant l'état d'un système, le plus souvent traduit par une surmortalité des individus d'une communauté.

RaDaR (pour Radio Detection and Ranging en anglais) : Méthode de télédétection basée sur des ondes électromagnétiques.

SAR (pour Synthetic Aperture Radar en anglais) : Radar à synthétique d'ouverture. Radar imageur qui effectue un traitement des données reçues afin d'améliorer la résolution en azimut.

Services écosystémiques : Avantages que les populations obtiennent du fonctionnement des écosystèmes (Constanza et al., 1997 ; Millennium Ecosystem Assessment -MEA, 2005).

SoNaR (Sound Navigation and Ranging) : Méthode de télédétection basée sur des ondes acoustiques.

Télédétection : Technique d'observation de la surface terrestre à partir d'images prises par des avions ou satellites.

Acronymes

SAU : Surface Agricole Utile

tC : tonne de carbone

tMF : tonne de matière fraîche

tMS : tonne de matière sèche

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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

En termes de topographie, on distingue la plaine côtière à très faibles altitudes (environ 30 m) et les terres du plateau des Guyanes entre 100 et 200 m d'altitude et où certains massifs peuvent aller jusqu'à 800 m (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).



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

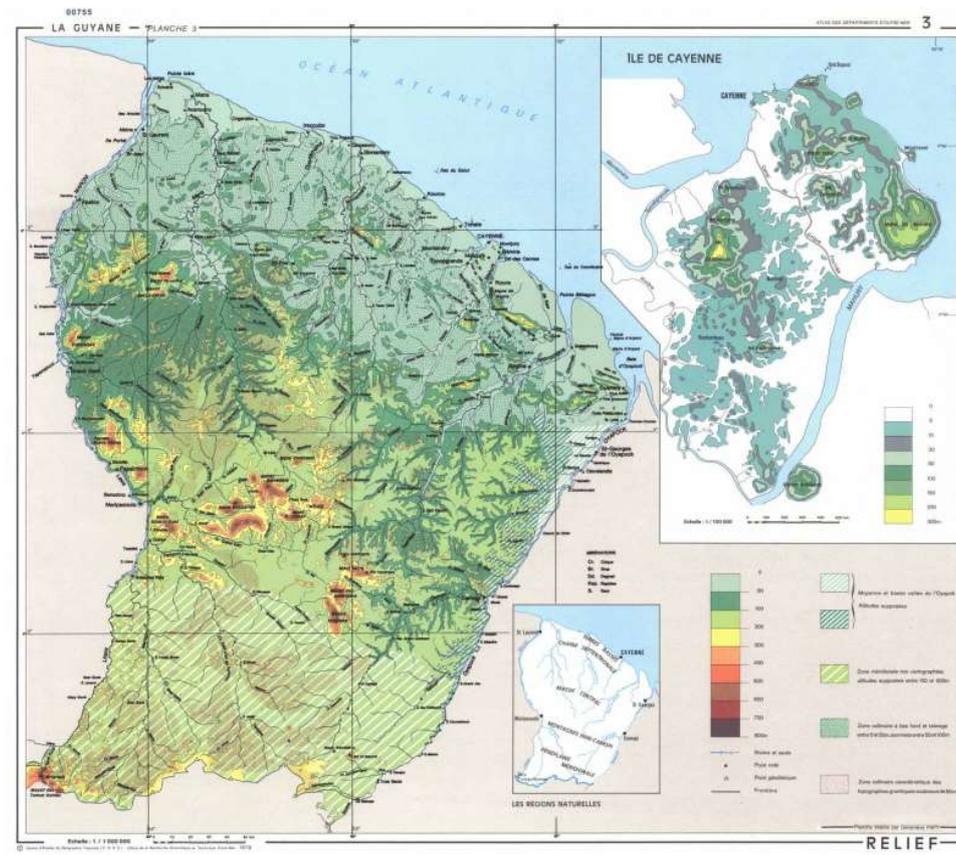


Figure 2 : Carte topographique de la Guyane française (IRD, 1979)

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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

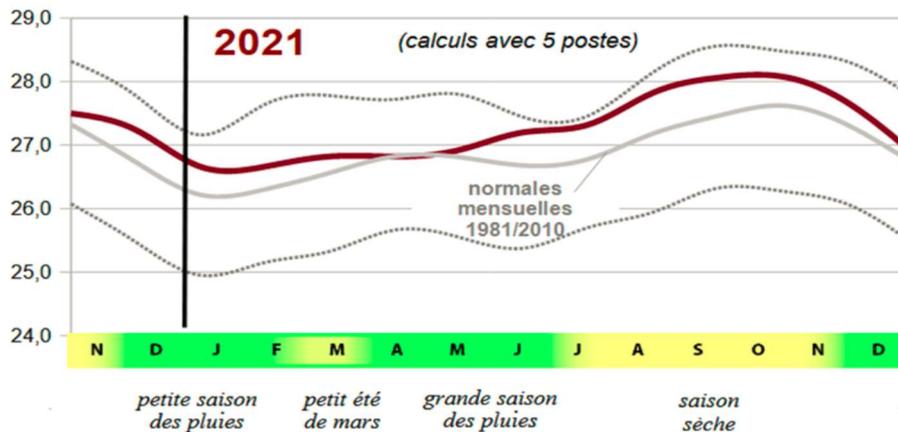


Figure 3 : Températures moyennes mensuelles en Guyane sur l'année 2021, exprimées en °C (Météo France)

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 » (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). 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).

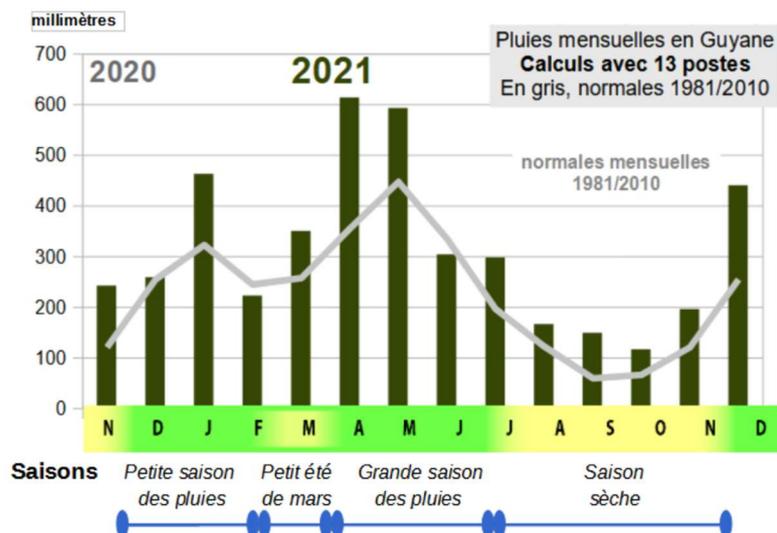


Figure 4 : Histogramme de pluviométrie mensuelle sur l'année 2021 (Météo France)

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.

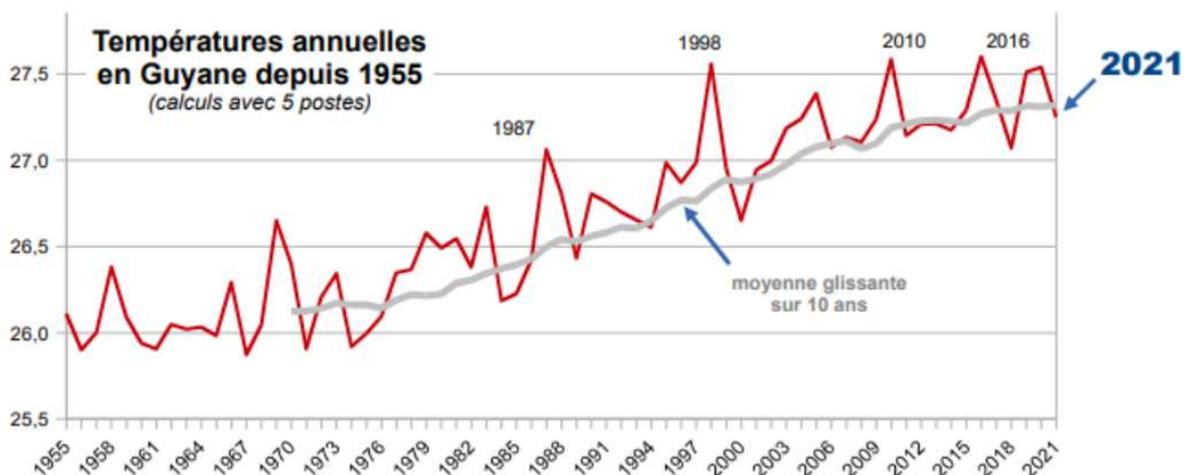


Figure 5 : Températures moyennes annuelles de 1955 à 2021, exprimées en °C (Météo France)

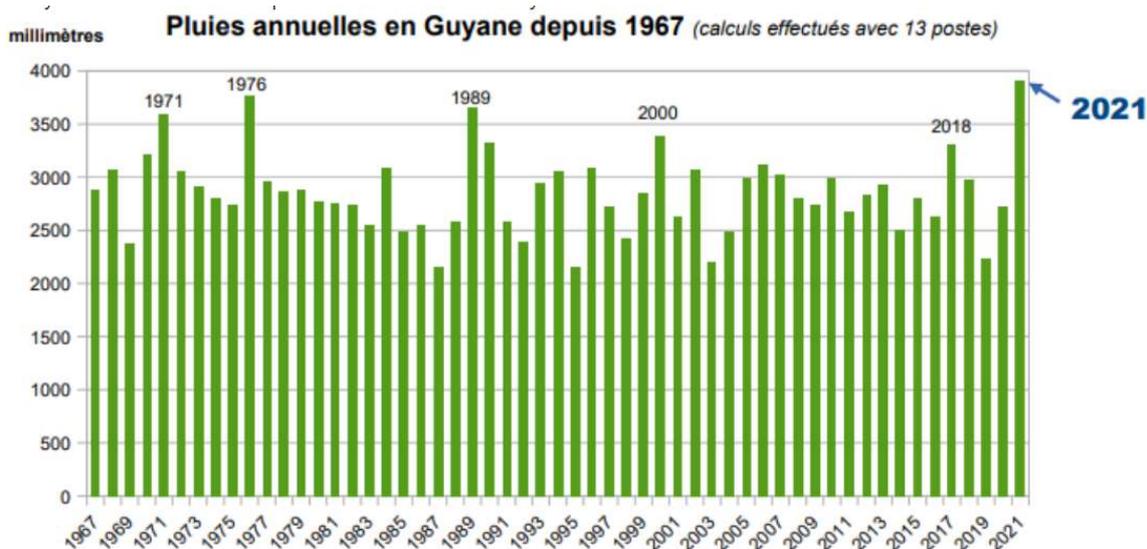


Figure 6 : Précipitations annuelles de 1967 à 2021 (Météo France, 2022)

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 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) lissés par l'action de grandes phases d'érosion à l'origine des roches sédimentaires. Les formations les plus jeunes correspondent aux dépôts alluvionnaires fluvio-marins de la côte (sand and clay sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

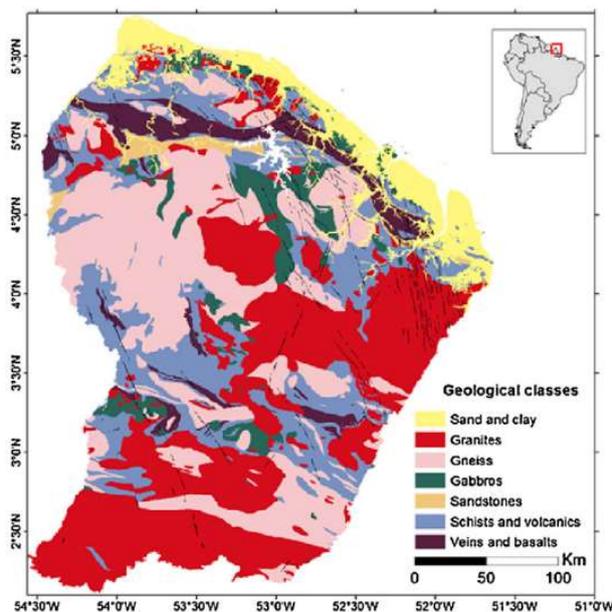


Figure 7 : Carte géologique simplifiée de la Guyane (Fayad, 2016)

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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

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),

² Correspondent à des collines.

parsemées de zones de montagnes (en rouge) et bordant des reliefs « multi concaves »³ au sud (en violet).

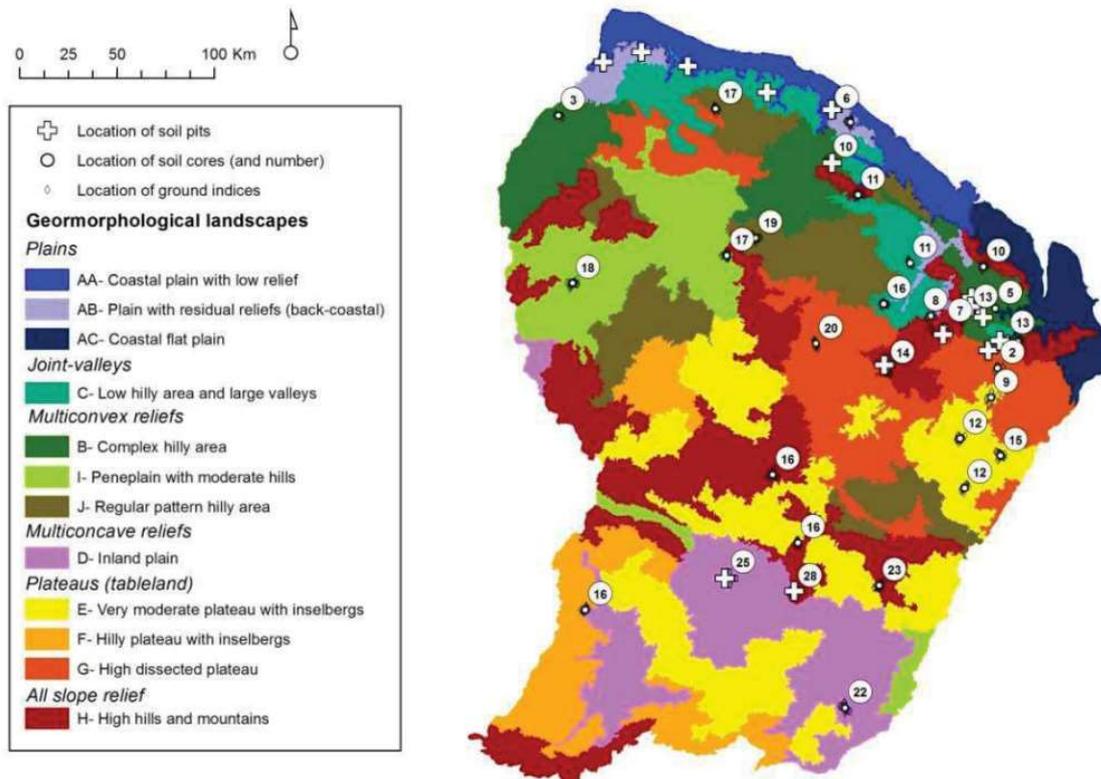


Figure 8 : Carte de répartition des paysages géomorphologiques (Guitet et al., 2013)

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) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), qui accueille notamment les dispositifs expérimentaux consacrés à l'étude de la forêt (sites de Paracou, Guyaflux, Nouragues, etc.).

³ Correspondent à des dépressions.

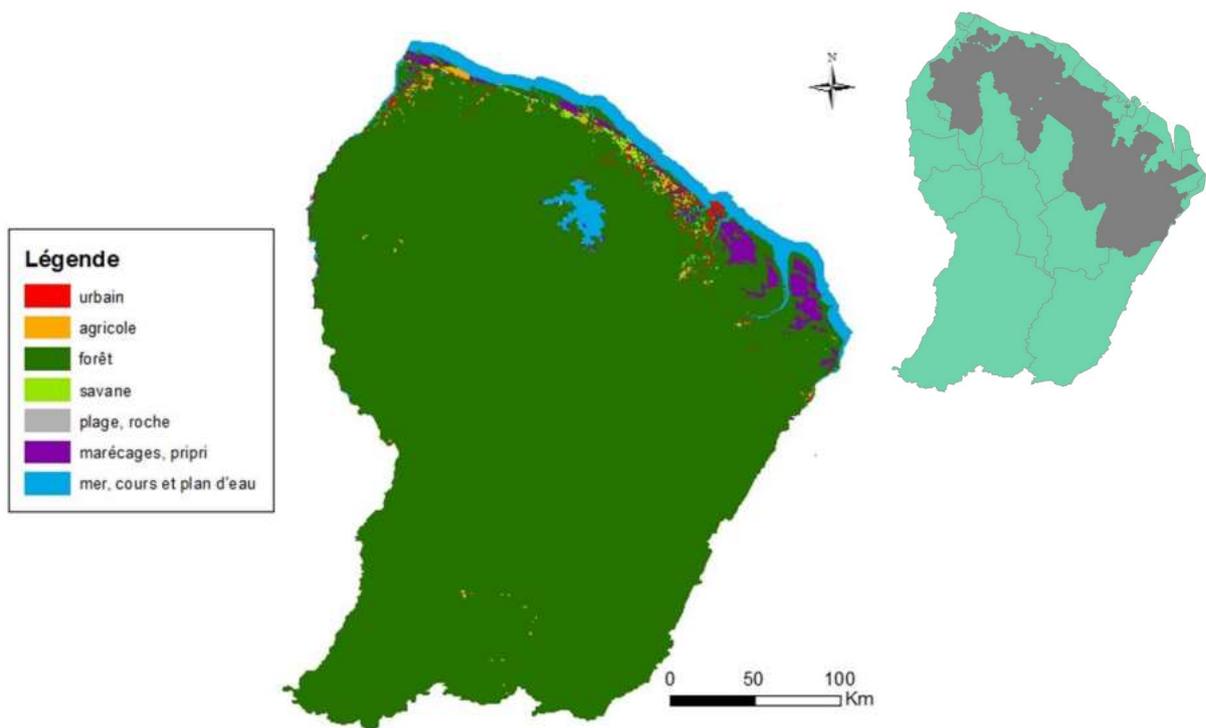


Figure 9 : Carte d'occupation du territoire de la Guyane en 2008 et du Domaine Forestier Permanent de l'ONF (en gris à droite) (source : Geo.data.gov et Rossi, 2014)

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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). 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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

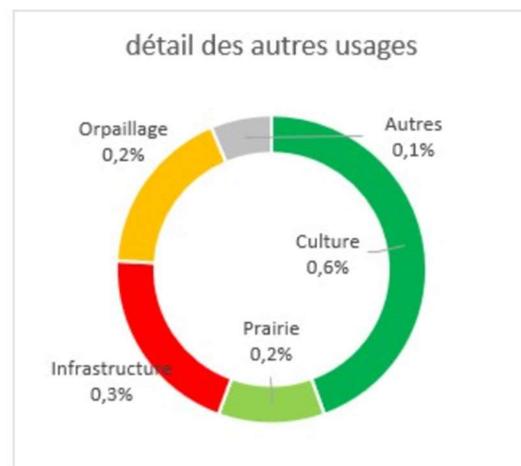
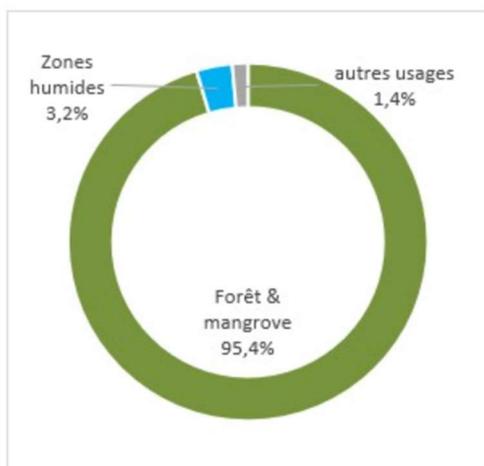


Figure 10 : Diagrammes de l'occupation des sols en Guyane en 2012 (source : Observatoire du carbone, 2013)

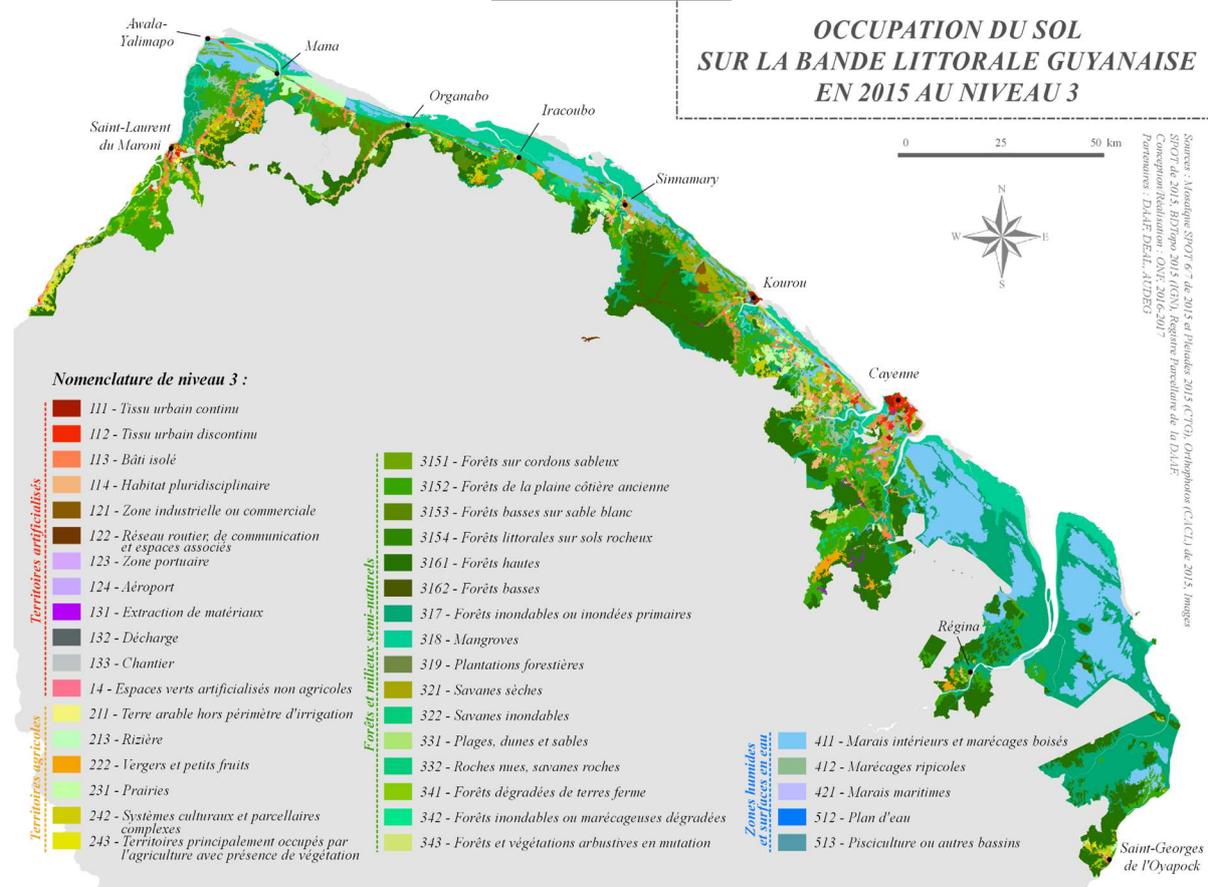


Figure 11 : Carte d'occupation des sols de la côte guyanaise en 2015 (source : Geo.data.gov)

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 Lecythidaceae (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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable. ; Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). On retrouve, réparties sur le territoire : les forêts des plaines

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.

et dépressions, les forêts des collines, les forêts des plateaux et hauts-reliefs ainsi que les forêts des zones marécageuses (Guitet et al., 2015a).

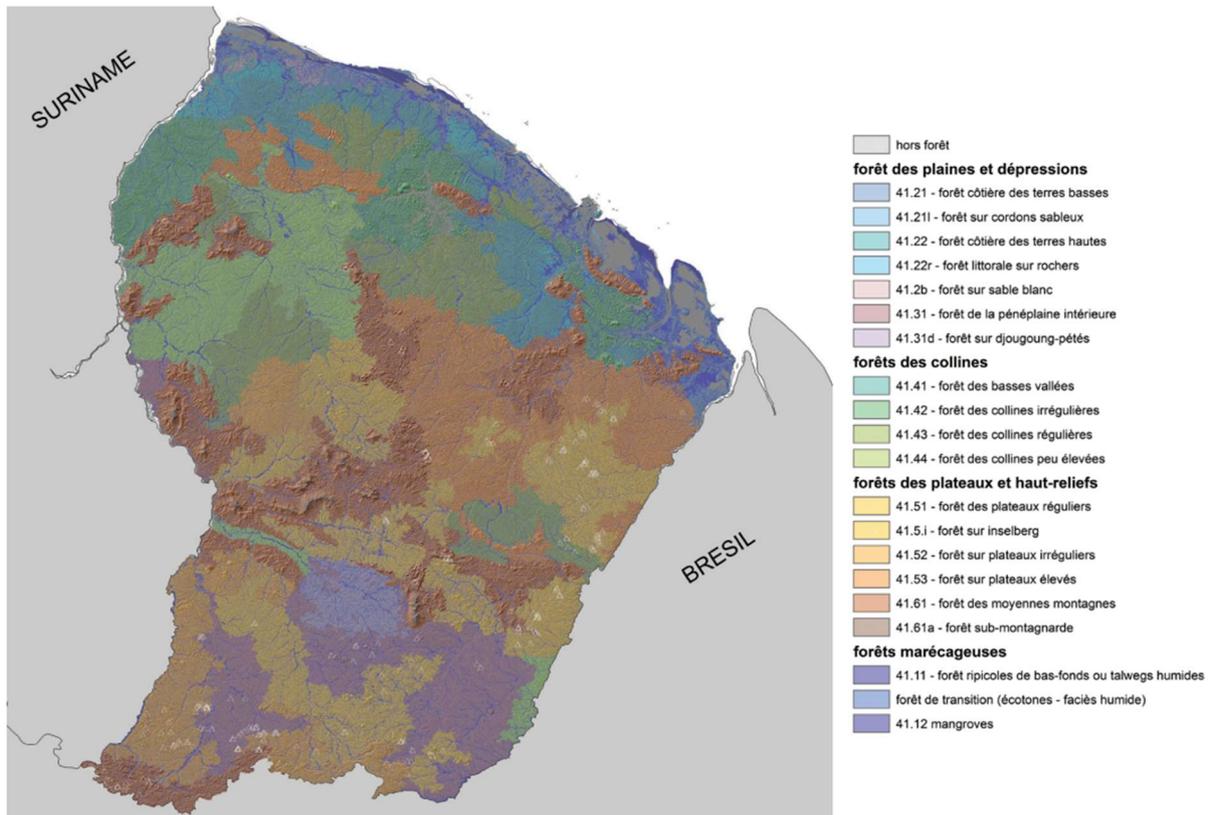


Figure 12 : Carte de répartition des habitats forestiers de Guyane (Guitet et al., 2015a, in ONF, 2015)

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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Suivant la salinité de l'eau, on retrouve trois types de palétuviers : les palétuviers gris (*Languncularia racemosa*), blancs (*Avicenia germinans*) et rouges (*Rhizophora* spp.).

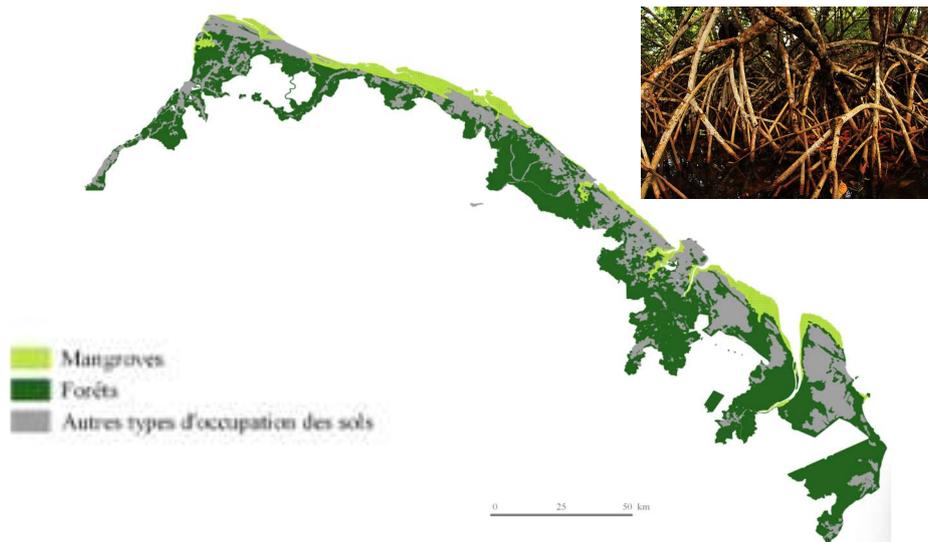


Figure 13 : Occupation du sol sur le littoral guyanais en 2015 (ONF, 2017) et photographie d'une mangrove à palétuviers rouges (source : IRD)

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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).



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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). 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).

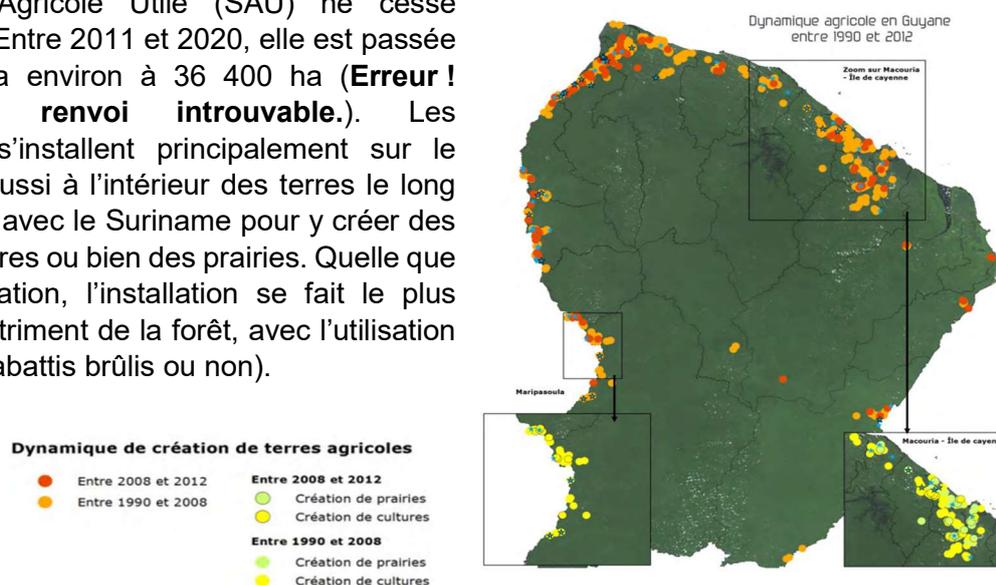


Figure 16 : Dynamique agricole en Guyane entre 1990 et 2012 (ONF Guyane – IGN, 2014, *in* Guyane Energie Climat, 2016)

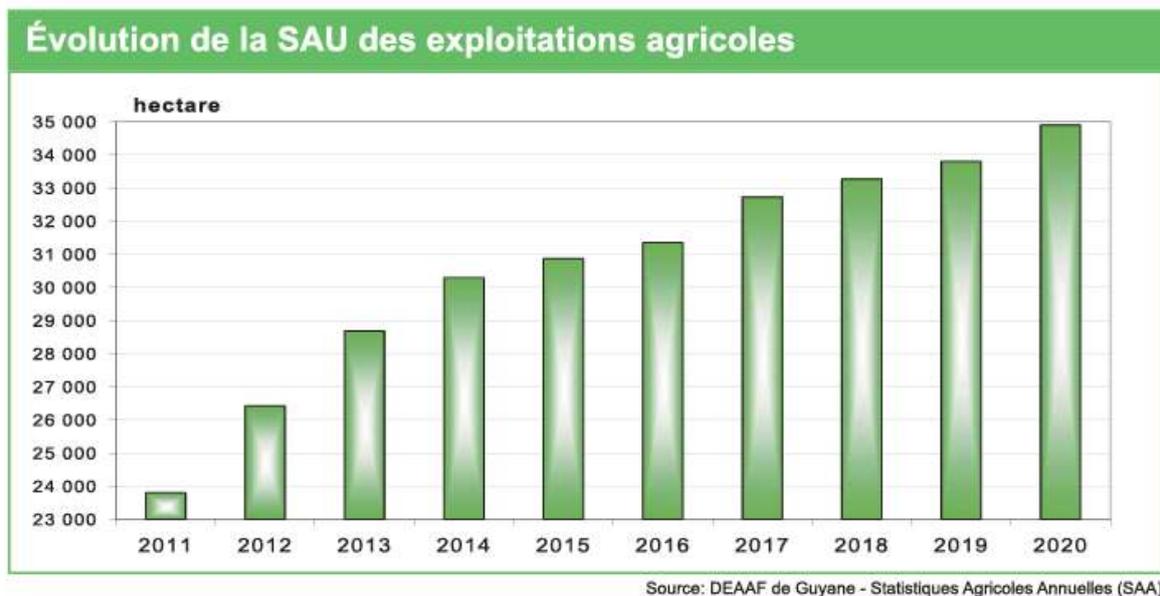


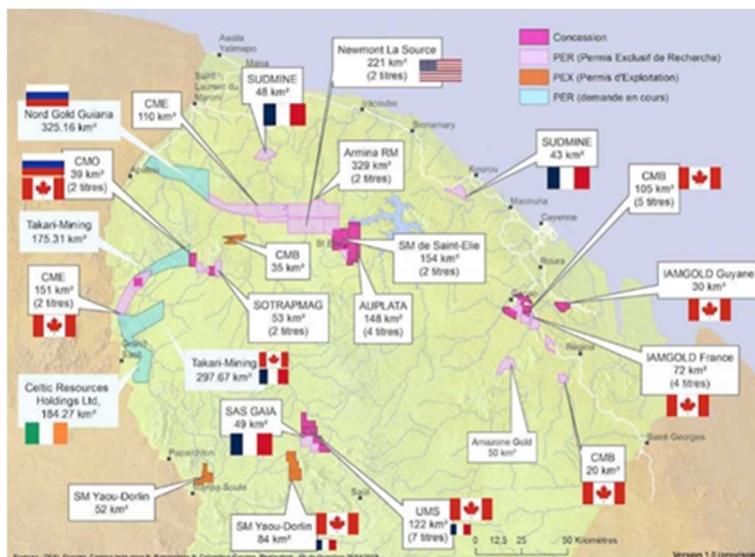
Figure 17 : Evolution de la SAU totale des exploitations agricoles en Guyane entre 2011 et 2020 (source : DEAAF de Guyane, 2021)

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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). 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 ; Lefèbvre 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).

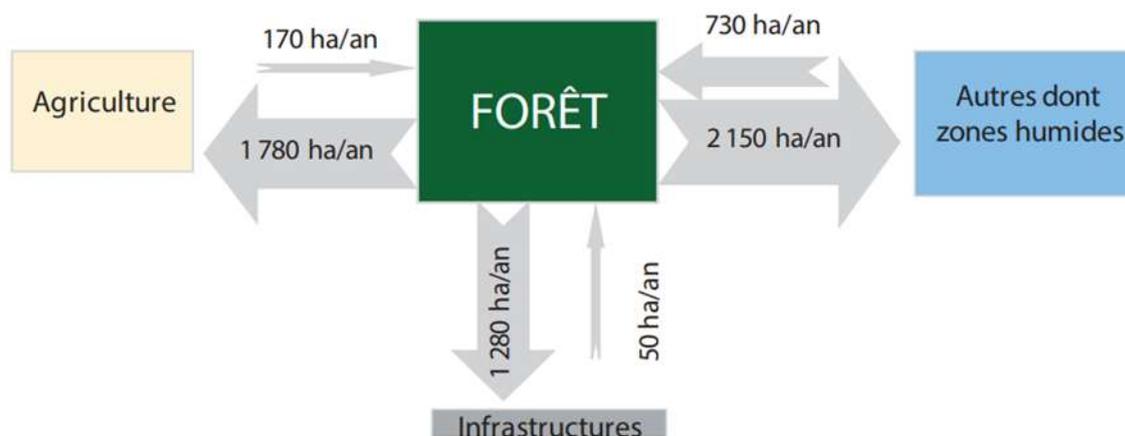


Figure 18 : Changement d'usage des sols en Guyane de 1990 à 2012 (IGN, 2015, d'après Lefèbre et Verger, 2014)

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 annuelles, la géologie, ainsi que d'autres variables), Guitet et al. (non publié) ont proposé une

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).

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).

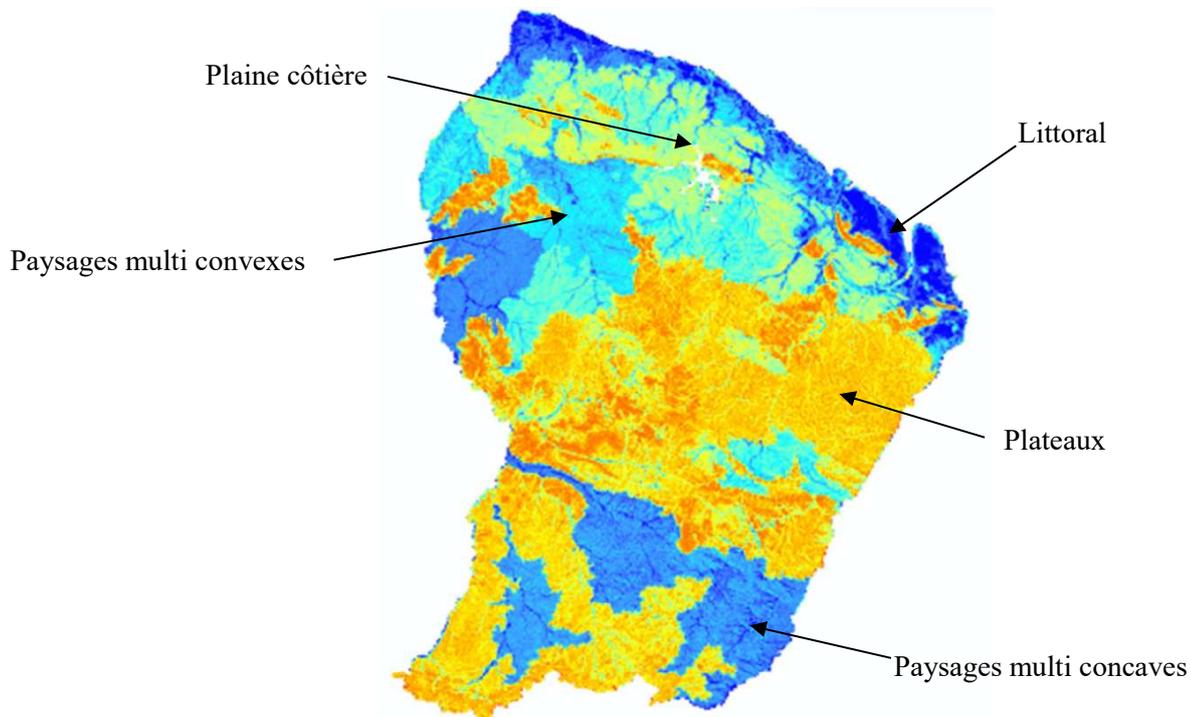


Figure 19 : Répartition des types de sols sur le territoire guyanais par Guitet et al. (non publié)

(orange = GERIC FERRALSOL ; rouge = AUTRE FERRASOL ; 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 aérien ?

2.1. Comment évaluer les stocks de carbone aérien ?

L'évaluation du stock de carbone aérien d'un arbre passe par l'évaluation de sa biomasse aérienne. Selon le GIEC, la biomasse vivante aérienne est définie comme étant « la biomasse de la végétation vivante, ligneuse et herbacée, au-dessus du sol, y compris les tiges, les souches, les branches, l'écorce, les graines et le feuillage ». Par convention, on considère que le carbone aérien représente 50 % de la biomasse aérienne contenue dans l'arbre, exprimée en tonnes de matière sèche (GIEC, 2006).

Dans la majorité des études inventoriées, la biomasse contenue dans les arbres de diamètre inférieur à 10 cm, dans les autres strates (arbustive et herbacée), dans les lianes et les palmiers n'est pas prise en compte car beaucoup plus difficile et/ou chronophage à mesurer. La « biomasse vivante aérienne » correspondra donc dans ce document à la masse fraîche ou sèche aérienne vivante des végétaux ligneux d'un diamètre supérieur à 10 cm. Cette différence de définition a plus ou moins de conséquences sur l'estimation de la biomasse vivante aérienne selon les faciès forestiers. Pour les peuplements dominés par les grands arbres, il existe peu de biais alors que pour des peuplements dominés par des arbres de faible diamètre, des lianes ou des palmiers, le biais est susceptible d'être important.

La biomasse d'un arbre s'exprime en tonnes de masse sèche ou tonnes de masse fraîche. Quelle que soit l'unité choisie, il s'agit d'une masse. Afin d'évaluer la biomasse « réelle » d'un arbre, il faut le couper pour le peser. On dit que c'est une méthode « destructive ».

Pour évaluer la biomasse d'un grand nombre d'arbres sans avoir à tous les couper, on utilise donc des modèles prédictifs. Les « équations allométriques » sont des modèles statistiques permettant d'estimer la biomasse d'un arbre en utilisant des données mesurables de façon non destructive comme le diamètre, la densité du bois et la hauteur. Elles sont construites grâce à la mesure de ces données ainsi que celle de la biomasse réelle (en coupant et en pesant l'arbre) sur un nombre d'arbres limité, permettant d'établir un lien mathématique réutilisable (on appelle cela le « calibrage de l'équation »).

Les « équations allométriques pantropicales » de Chave sont les plus répandues et utilisées (Equation 1). Au total, des données récoltées sur plus de 4 000 arbres, coupés et décrits sur 58 sites, ont été utilisées afin de calibrer les équations (Chave et al., 2014). Il existe également des équations allométriques qui ont été spécifiquement développées en Guyane française. Elles sont décrites dans Dourdain et Hérault (2015).

$$\text{Biomasse vivante aérienne (en kg)} = 0,0673 \times (\text{densité du bois en g/cm}^3 \times \text{diamètre en cm à hauteur de poitrine}^2 \times \text{hauteur en m})^{0,976}$$

Equation 1 : Équations allométriques pantropicales de Chave et al., (2014)

Les équations allométriques utilisent des mesures généralement intégrées dans les inventaires forestiers, parcelles dans lesquelles les arbres au-dessus d'un diamètre minimum ont été inventoriés, mesurés et identifiés botaniquement sur une surface connue. Les équations peuvent donc être appliquées à chacun des arbres pour calculer leur biomasse, et la somme des biomasses estimées permet d'obtenir la biomasse de la parcelle. Pour accéder à la densité du bois d'un arbre, on se sert de la moyenne (ou médiane) de son espèce.

En Guyane, plus d'une quinzaine d'inventaires forestiers ont été réalisés, dans lesquels plus de 350 000 arbres ont été identifiés. Les parcelles des inventaires sont réparties sur le territoire

et représentent une diversité d'habitats qui peuvent être caractérisés par des variables environnementales (topographie, hydrologie, etc.).

Les données des inventaires forestiers (biomasse aérienne et variables environnementales) permettent ainsi de calibrer des modèles qui estiment la biomasse d'une zone en fonction de ses variables environnementales. On peut alors accéder à des estimations de la biomasse aérienne forestière sur toutes les zones où les conditions environnementales sont décrites (dans des cartes topographiques, hydrographiques, etc.). C'est l'« extrapolation ».

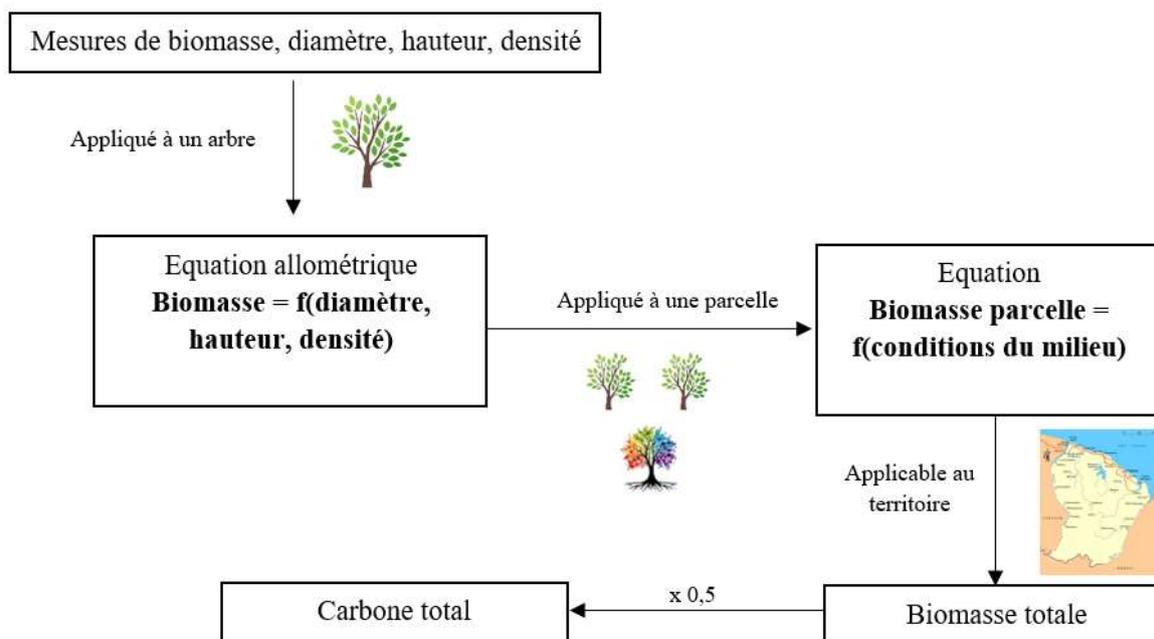


Figure 20 : Schéma récapitulatif de la méthode employée pour estimer le carbone aérien forestier à l'échelle d'un territoire

2.2. Les stocks de carbone aérien évalués en Guyane

2.2.1. Sur l'ensemble du territoire

Trois travaux font figure de références en Guyane en termes d'estimation de la biomasse aérienne forestière : ceux de Molto (2012), de Guitet (2015) et de Fayad (2016). Les estimations reposent sur la méthode précédemment expliquée, avec des variations dans les variables utilisées et les modèles calibrés.

Les stocks de biomasse aérienne et ainsi de C sont estimés entre 1,04 et 1,32 milliards de tonnes de C sur l'ensemble du territoire (Tableau 2). Molto (2012) a d'abord construit des équations allométriques à partir de données récoltées dans les années 1970 pendant le projet Ecerex (Lescure et al., 1983), au cours duquel plus de 300 arbres ont été coupés et décrits. Il a utilisé 4 inventaires forestiers (inventaires Papetier, Guyafor, Bridge et Amalin), soit environ 270 000 arbres inventoriés, et la géologie, le climat, la topographie et l'hydrologie comme variables environnementales pour l'extrapolation.

Guitet (2015) a utilisé les équations allométriques pantropicales de Chave (2014), les parcelles de l'inventaire de l'Office National des Forêts (ONF) réalisé entre 2006 et 2012 et celui des

Papetiers (soit environ 83 000 arbres inventoriés), la topographie, l'hydrographie, le climat, la végétation, la géologie et la géomorphologie comme variables environnementales.

L'estimation de Fayad (2016) repose sur la même méthode que celle de Guitet (2015). Cependant, la hauteur des arbres a été évaluée par télédétection grâce à un LiDaR satellitaire (Cadre 1), offrant à la Guyane la meilleure estimation de biomasse aérienne forestière à ce jour.

	Stock de carbone aérien (GtC)
Molto (2012)	1,04 (± 0.2)
Guitet (2015)	1,28 (RMSE = 66,0 tC/ha) (R ² =0,35)
Fayad (2016)	1,32 (RMSE = 50,2 tC/ha) (R ² =0,66)

Tableau 2 : Récapitulatif des stocks de carbone aérien forestiers évalués sur l'ensemble du territoire guyanais

RMSE : Root-Mean-Square Deviation ou racine de l'erreur quadratique moyenne

NB : Dans ses travaux, Molto (2012) exprime le stock de biomasse aérienne forestière mais pas le stock de CA. En effet, de manière générale, on considère que la biomasse vivante contient 50 % de C, valeur représentant le facteur de conversion entre les stocks de biomasse exprimés en tonnes de Matière Sèche (MS) et les stocks de C.

Or les évaluations de biomasse aérienne précédemment décrits permettent d'apprécier les stocks en tonnes de Matière Fraîche (MF). La conversion de MS à MF est régie par une équation mathématique ($MS = (1 - \% \text{ en eau}) \times MF$). Or cette conversion induit une source d'erreur qui n'avait pas pu être prise en compte au moment des travaux de l'auteur. Ainsi, il explique ne pas appliquer le facteur de conversion par manque de connaissance sur l'erreur permettant de passer de la biomasse fraîche à la biomasse sèche et au contenu en C dans la biomasse sèche.

Cadre 1 : La télédétection au service de l'évaluation du carbone aérien des forêts

La télédétection regroupe les techniques d'acquisition d'informations à distance concernant l'organisation de la surface terrestre. Elle utilise notamment des technologies qui envoient des ondes pour détecter la présence d'un objet et sa position. Concernant la biomasse végétale, on utilise le LiDaR (« Light Detection and Ranging »). C'est un système qui utilise de la lumière (laser), à la différence du RaDaR (« Radio Detection and Ranging ») qui utilise des ondes électromagnétiques, et du SoNaR (« Sound Navigation and Ranging ») qui utilise des ondes acoustiques.

Dans la même logique que pour les équations allométriques, pour associer un signal LiDaR à une valeur de biomasse, il faut que des équations aient été calibrées au préalable en utilisant des données acquises sur le terrain. C'est tout l'enjeu du développement des technologies de télédétection dans l'estimation de la biomasse aérienne des forêts (Chave et al., 2019).

2.2.2. Par habitat forestier

Le carbone stocké dans la biomasse aérienne des forêts guyanaises est de l'ordre de 1,3 Gt au total. Cependant, il ne se répartit pas uniformément sur le territoire (Figure 22 et Tableau 3). Les forêts des plateaux et des montagnes au centre de la Guyane présentent les stocks les plus importants, avec des valeurs allant jusqu'à 250 tC/ha (en rouge et jaune). Les habitats des reliefs multi-convexes (les collines), des vallées et de la plaine côtière plus au nord se situent à un niveau intermédiaire de 150 tC/ha (en vert), avec des variations locales conduisant à des valeurs allant jusqu'à 187,5 tC/ha (en jaune). Enfin, les paysages multi-concaves (les dépressions) au sud présentent les stocks les moins élevés du territoire, entre 75 et 150 tC/ha (en bleu).

Type d'habitat	Stocks de biomasse aérienne (tMS/ha)	Stocks de CA (tC/ha)
Forêts de plateaux et de montagnes	300 - 500	150 - 250
Forêts des reliefs multi-convexes, des vallées et de la plaine côtière	300 - 375	150 - 187,5
Forêts des habitats multi-concaves	150 - 300	75 - 150

Tableau 3 :Récapitulatif des stocks de biomasse et de carbone aériens par hectare moyen en fonction des habitats forestiers définis par Guitet (2015)

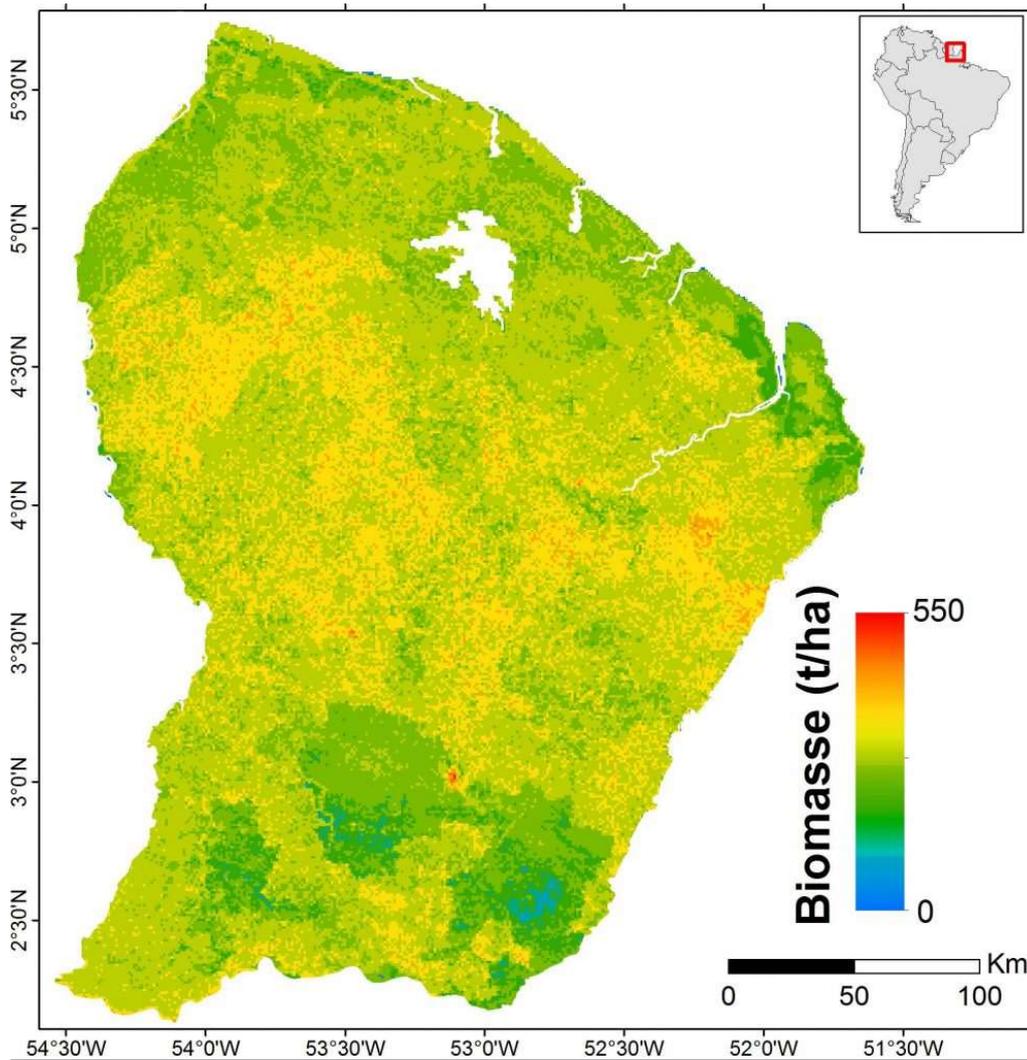


Figure 21 : Carte de distribution de la biomasse vivante aérienne sur le territoire guyanais (Fayad, 2016)

La biomasse est exprimée en t/ha. La carte est obtenue par fusion de données LiDaR, RaDaR, optiques et d'autres jeux de données environnementales. Chaque pixel représente 1 km², et la précision sur l'estimation de la biomasse est de 50 tMS/ha.

2.3. Les modèles d'évaluation du carbone aérien : sources d'incertitudes et d'imprécisions

L'estimation du carbone aérien à l'échelle d'un territoire implique l'utilisation de modèles qui introduisent une incertitude plus ou moins grande. Dans notre étude, il s'agit d'une différence entre la valeur estimée et la valeur réelle de stock de carbone aérien (que l'on aurait obtenue si on avait coupé et pesé chaque arbre). La réduction de cette incertitude est l'un des enjeux majeurs pour l'estimation des stocks de C.

Les travaux de Molto (2012) et de Réjou-Méchain et al. (2019) montrent comment chaque étape de l'estimation de la biomasse aérienne, à l'échelle de l'arbre, de la parcelle puis du territoire, participe à l'incertitude finale. Les auteurs décrivent également les pratiques permettant de réduire cette erreur, notamment la place des nouvelles technologies comme le LiDaR.

Pour quantifier l'erreur finale, l'incertitude apportée par chaque modèle (équations allométriques, modèle d'extrapolation, etc.) est « propagée » jusqu'à l'estimation finale (Molto, 2012). Des programmes informatiques permettent de propager automatiquement l'incertitude (package « BIOMASSE » sous le logiciel R - Réjou-Méchain et al., 2017). Cela permet notamment de déterminer les intervalles de confiance associés aux estimations de stock de carbone.

Aujourd'hui, les scientifiques considèrent que la principale source d'erreur dans l'estimation de la biomasse estimée provient de phénomènes naturels liés à la dynamique des forêts (B. Hérault, chercheur en écologie forestière au Cirad). Par exemple, la chute naturelle des arbres entraîne l'apparition de chablis dont la fréquence d'apparition et la taille sont difficiles à prévoir (c'est le phénomène de « gap dynamic »). Elle entraîne des variations locales de biomasse aérienne, qui est néanmoins détectable avec les moyens de télédétection, et l'estimation des chablis est un enjeu important dans l'estimation des stocks (Goulamoussène et al., 2017).

Les cartes de distribution de la biomasse aérienne sur le territoire guyanais (Molto, 2012 ; Guitet, 2015 ; Fayad, 2016) sont accompagnées de cartes d'incertitudes permettant d'apprécier la variabilité des estimations liée à l'incertitude en tout point du territoire. Elles ne sont pas présentées dans ce rapport. De manière générale, plus on s'éloigne des parcelles d'inventaires forestiers (concentrées sur le littoral), plus l'incertitude augmente.

Aujourd'hui, les estimations de Fayad (2016) (1,32 GtC sur l'ensemble du territoire) sont considérées comme les plus proches de la réalité, et ce grâce à l'introduction de la technologie LiDaR pour l'estimation de la hauteur des arbres (B. Hérault). En effet, il existe un bon niveau de corrélation entre la hauteur des forêts et la quantité de biomasse (Lefsky et al., 2005).

2.4. Le cas des mangroves

Les travaux précédemment cités prennent en compte la biomasse contenue dans la végétation côtière, c'est-à-dire les mangroves. Celles-ci n'ont pas fait l'objet de considérations spécifiques et leur stock a été calculé de la même façon que pour le reste de la végétation forestière. Or les mangroves représentent une structure particulière. Avec un gradient d'âge de la côte vers l'intérieur des terres où l'on retrouve les mangroves les plus âgées, elles présentent une véritable succession de densité et de taille des arbres, et ainsi de biomasse aérienne (Figure 23).

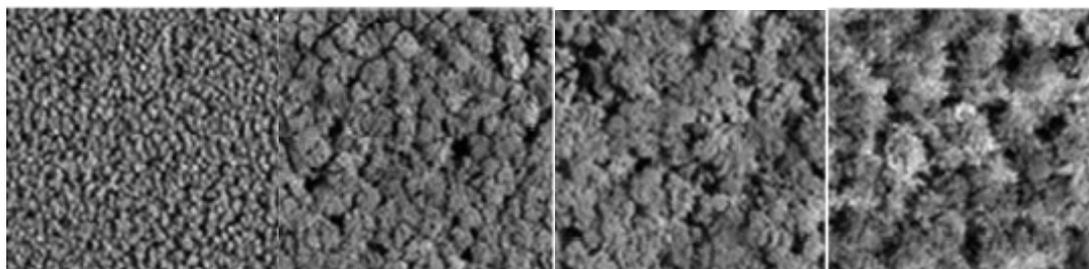
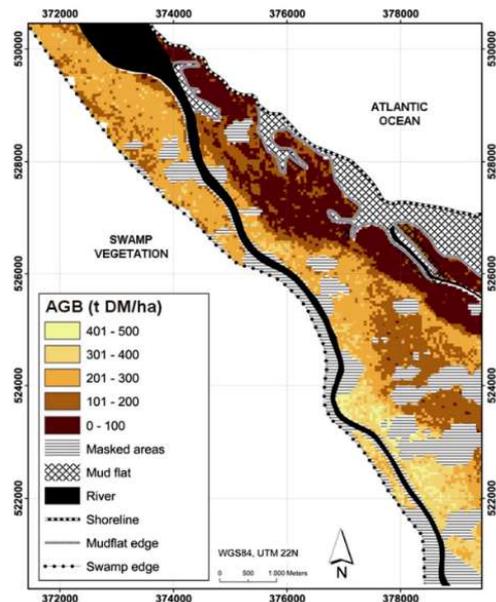


Figure 22 : Photographie aérienne de 4 mangroves d'âges différents (de la plus jeune à gauche à la plus vieille à droite) prises dans le secteur de Kaw (Proisy et al., 2007)

Proisy et al. (2007) sont les premiers auteurs à avoir proposé une cartographie des stocks de biomasse aérienne de la mangrove, évalués par télédétection sur une petite partie du territoire. C'est la technologie Fourier-based Textural Ordination (FOTO) qui a été utilisée, basée sur

des indicateurs texturaux de photographies de la canopée (Figure 24). Ainsi, des mesures de terrain (nombre d'arbres, diamètre à hauteur de poitrine) effectuées entre 2002 et 2005 sur les sites de Kaw et de Sinnamary (16 et 10 placettes respectivement de 200 m² à 1 ha), ainsi que les équations allométriques de Fromard et al. (1998) ont été utilisées. Les auteurs ont ainsi montré que les stocks de biomasse aérienne et ainsi de carbone aérien étaient fortement corrélés à l'âge de la mangrove, avec des stocks de 0 à 50 tC/ha pour les stades les plus juvéniles et de 200 à 250 tC/ha pour les mangroves les plus âgées.



AGB : Aboveground Biomass ou biomasse aérienne ; DM : Dry Matter ou matière sèche.

A l'échelle du territoire guyanais, Walcker (2015) a évalué le stock de carbone aérien dans les mangroves à 0,008 Gt en 2014 grâce à l'imagerie satellite et l'utilisation des équations allométriques de Fromard et al. (1998), soit 0,6 % de la biomasse aérienne forestière totale évaluée par Fayad (2016). La biomasse aérienne des mangroves était répartie à 86 % dans les vieux peuplements (> 50 ans) qui représentaient 61 % des surfaces de mangroves, pour seulement 5,8 % de la biomasse aérienne dans les jeunes mangroves (< 10 ans) qui représentaient, quant à elles, 23 % des surfaces de mangroves.

3. Quels sont les principaux déterminants des stocks de carbone aérien ?

Cadre 2 : la forêt guyanaise, puits ou source de carbone ?

La forêt amazonienne est souvent présentée comme un « puits » de carbone, c'est-à-dire capable d'absorber et de stocker à long terme le carbone de l'atmosphère, présent sous forme de CO₂. Pourtant, cette affirmation divise les scientifiques, notamment depuis l'accélération de l'exploitation forestière, de la déforestation ainsi que du changement climatique à l'échelle mondiale et notamment en Guyane (Brienen et al., 2015 ; Hubau et al., 2020 ; Piconiot, 2018). La forêt ne serait alors plus un « puits » de carbone, mais une « source ».

Qu'en est-il de la forêt guyanaise ? Aujourd'hui encore, le débat n'aboutit pas à un consensus parfait, et est décrit dans l'annexe « La forêt : puits ou source de carbone ? ».

3.1. Quels sont les déterminants de la variabilité spatiale ?

Pour rappel, la fraction moyenne de C dans la biomasse vivante aérienne est fixée à 50 % (GIEC, 2006). Ainsi, le stock de CA d'une forêt est directement lié à son stock de biomasse aérienne et la carte de distribution produite par Fayad (2016) a permis d'observer une importante variabilité sur le territoire (

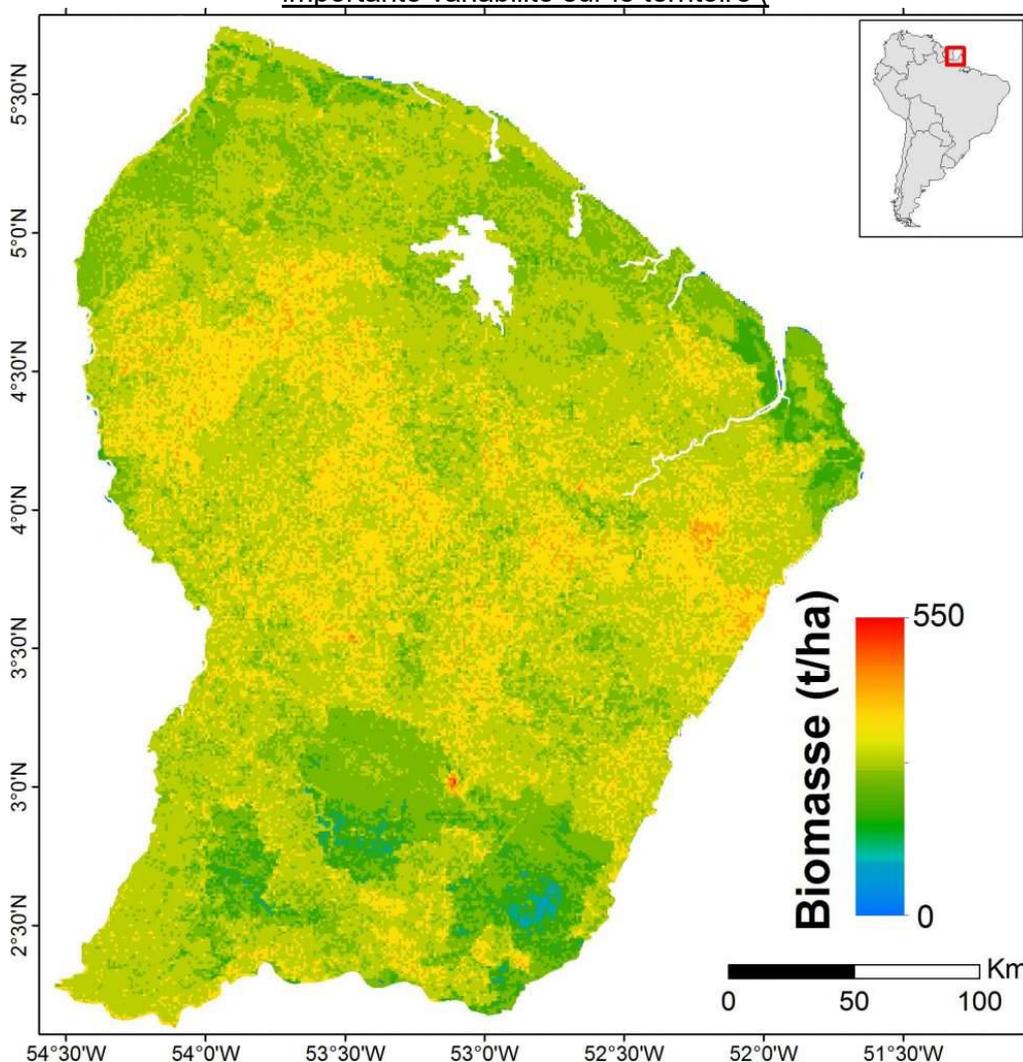


Figure 21). En effet, on observe des stocks de CA allant de 75 tC/ha à 250 tC/ha. Les paysages de montagnes et de plateaux au centre de la Guyane ont des valeurs plus importantes que les plaines côtières et les dépressions au nord et au sud.

Les paysages géomorphologiques permettent de décrire les stocks de CA. Par ailleurs, les travaux de Guitet et al. (2013) ont montré qu'ils permettaient d'expliquer le mieux les variations de stocks de CA observées à l'échelle du territoire, parmi la topographie, l'hydrographie, le climat, la végétation, la géomorphologie et la géologie (Guitet et al., 2013). En effet, les paysages géomorphologiques témoignent de l'évolution de la forme du relief, façonné par des phénomènes d'érosion dus au climat, sur un certain substrat géologique et à l'origine de la mise en place de faciès forestiers particuliers. La suite de cette partie fait état des connaissances sur les autres facteurs de variation spatiale des stocks de CA étudiés en Guyane.

3.1.1. La texture du sol

La texture d'un sol est définie par sa proportion en argile, limon et sable, trois types de particules de tailles différentes. Le sable rend les sols perméables et meubles. Au contraire, l'argile est à l'origine d'une absorption d'eau et possède des propriétés liantes.

Soong et al. (2020) ont mis en relation les propriétés du sol (taux d'argile, COS, abondance de champignons mycorhiziens⁶, teneur en oxyde et hydroxyde de fer et d'aluminium et teneur en phosphore extractible), la croissance des arbres, la mortalité et les stocks de biomasse aérienne de 12 sites forestiers répartis sur le territoire guyanais (Figure 26).

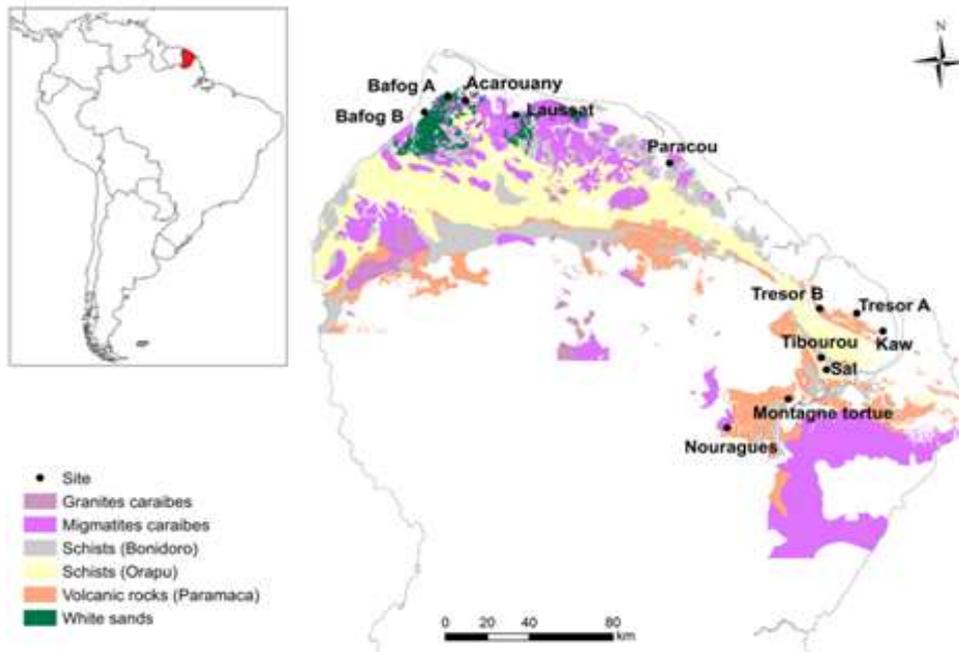


Figure 25 : Sites d'étude des travaux de Soong et al., 2020

Le taux d'argile dans les sols était positivement corrélé au COS, au taux de phosphore et à l'abondance de champignons mycorhiziens. En revanche, il était négativement corrélé au taux de phosphore extractible. De même, il était positivement corrélé à la mortalité et à la vitesse de croissance des arbres, allant de 0,81 à 2,1 mm/an (diamètre pris à hauteur de poitrine) pour des taux d'argile de 0 à 67 %. Enfin, aucun lien significatif n'a été observé entre le taux d'argile du sol et les stocks de biomasse aérienne.

Cette étude illustre le principe du « turn-over », pouvant être traduit par le temps de renouvellement. L'excès de croissance est compensé par un excès de mortalité ne permettant pas une accumulation de biomasse et réduisant le temps de séjour du C dans le compartiment biomasse aérienne.

⁶ Les champignons mycorhiziens sont des champignons qui ont la capacité d'entrer en symbiose avec les racines de certaines espèces floristiques. Ils se développent entre ou dans les cellules végétales racinaires, permettant d'augmenter la surface d'absorption des nutriments minéraux du sol. En échange, la plante fournit les nutriments organiques nécessaires à la croissance des champignons.

D'après cette étude, les sites riches en argile sont capables de mettre en place des stratégies d'amélioration de l'absorption des nutriments du sol (notamment pour palier la pauvreté en phosphore extractible) grâce aux champignons mycorhiziens. Les nutriments du sol sont plus rapidement mobilisés, ce qui permet une augmentation de la vitesse de croissance des arbres, compensée cependant par un supplément de mortalité. Les stocks de CA restent identiques à ceux d'une forêt installée sur un sol moins riche en argile, avec une croissance, une mortalité et un cycle des nutriments et du C (« turn-over ») plus lent (Soong et al., 2020) (Figure 27).

Ainsi, les propriétés du sol peuvent expliquer les observations de variations des dynamiques forestières (en termes de croissance et de mortalité) mais ne permettent pas d'expliquer les variations de stocks de CA observées sur le territoire guyanais.

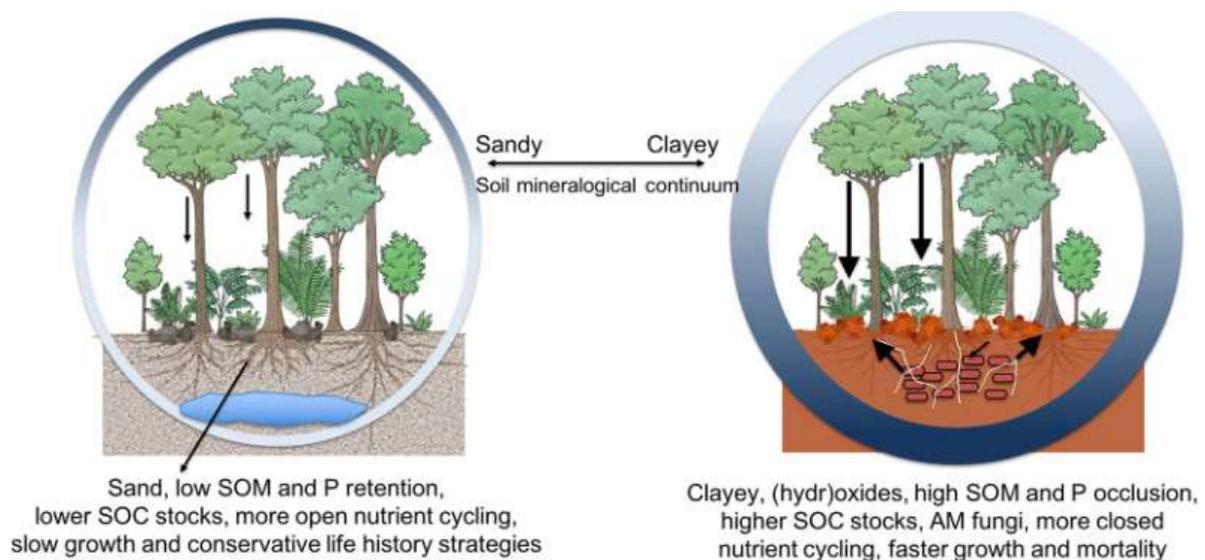


Figure 26 : Schéma simplifié de l'influence des sols sur la croissance et la mortalité des arbres, mais pas sur la biomasse (Soong et al., 2020)

NB : La variation des stocks de C dans un compartiment et un intervalle de temps donnés se calcule par la différence entre les stocks à l'instant initial et à l'instant final ou en s'intéressant aux flux entrants et aux flux sortants dans le compartiment étudié.

Pour le CA, les flux entrants correspondent à la croissance et au recrutement des arbres. En effet, la croissance est issue de l'absorption du CO₂ atmosphérique intégré dans la biomasse végétale via la photosynthèse. Le recrutement correspond au nombre d'arbres atteignant un diamètre suffisamment important (10 cm dans la plupart des études) pour être comptabilisés dans les inventaires forestiers et faire partie de la biomasse théorique calculée. Enfin, la mortalité correspond au nombre d'arbres « sortants » du compartiment « biomasse vivante aérienne » pour passer dans le compartiment « biomasse morte ».

Ainsi, l'appréciation des variations de stocks de CA nécessite des connaissances sur les variations de croissance, de mortalité et de recrutement des arbres. En sus, elle nécessite des connaissances sur la vitesse de variation de ces paramètres : si une forêt a une croissance, un recrutement et une mortalité plus rapides lorsque certaines conditions climatiques sont réunies, les stocks ne peuvent augmenter que dans le cas où l'augmentation des vitesses de croissance et de recrutement sont plus importantes que l'augmentation de mortalité.

3.1.2. La topographie

Les études menées en Guyane ont montré que la topographie était un déterminant spatial « indirect » des stocks de COS, les bas-fonds étant soit sujets à une faible accumulation d'argile « fixatrice » de matière organique, soit à l'engorgement en eau et donc à l'accumulation en matière organique.

Sur le site de Paracou, Ferry et al. (2010) ont noté une biomasse aérienne inférieure de 43 % dans les bas-fonds par rapport aux sommets des collines. En étudiant les taux productivité de biomasse et de mortalité, ils y observent une productivité inférieure de 9 % et une mortalité supérieure de 40 %. Sur le dispositif de Guyaflux, Rolland (2006) a observé la même variabilité de mortalité, avec une augmentation des pertes de 12 tMS/ha/an dans les bas-fonds, souvent sableux et très meubles.

De manière générale, un enracinement superficiel combiné à des sols meubles (c'est-à-dire pauvres en argile) augmente la sensibilité des arbres aux épisodes de sécheresse et à la mortalité. En Guyane, c'est plutôt la combinaison de sols saturés en eau et du vent (même peu puissant) qui entraîne des chablis, c'est-à-dire des chutes d'arbres en cascade (Aubry-Kientz et al., 2015) (Figure 25). Ferry et al. (2010) ont en effet observé des taux de chute plus élevés le long d'un gradient topographique allant du sommet des collines aux bas-fonds, et Rolland (2006) que les arbres n'étaient pas cassés mais déracinés.



Figure 27 : Photographie aérienne d'un macro-chablis (5 km de long sur 50 ha) en 2010 entre Mana et Petit-Saut (source : ONF, d'après Image SPOT du 31/07/2010 KJ 688-339 fournie par SEAS-Guyane © CNES)

Or l'ouverture de la canopée permet la croissance d'espèces exigeantes en lumière, mais aussi à faible densité de bois. En effet, les auteurs ont également observé des densités de bois 10 % inférieures dans les bas-fonds par rapport aux hauts de collines (Ferry et al., 2010). Cela réduit le stock de biomasse et donc de carbone aérien et explique les observations faites dans les bas-fonds (Ferry et al., 2010).

3.1.3. La diversité des espèces floristiques

Avec une complémentarité des niches ainsi que l'effet de facilitation (effet selon lequel la présence d'une espèce bénéficie, via la création de conditions favorables, à l'installation, la

vie ou la survie d'autres espèces), la théorie écologique soutient que les écosystèmes diversifiés seraient plus productifs. Dans une étude de données sur plus de 770 000 sites répartis dans 44 pays à travers le monde et représentatifs de tous les biomes, Liang et al. (2016) ont en effet observé une corrélation positive entre la diversité spécifique des arbres et la productivité de l'écosystème à l'échelle de la parcelle, du pays et du biome.

La productivité d'un écosystème est définie comme étant l'accroissement de biomasse sur un temps donné. Or, comme vu précédemment, la caractérisation de l'accroissement n'est pas suffisante pour évaluer l'évolution de stocks de biomasse et donc de CA.

Par ailleurs, il n'existe pas vraiment de consensus scientifique à l'heure actuelle sur le lien entre biodiversité et stocks de carbone. En effet, en plantation, la diversité est globalement considérée comme très favorable à des meilleurs stocks de C à terme (B. Hérault). Cependant, en forêt naturelle, le lien est contestable et le peu d'études réalisées jusqu'à maintenant met en exergue le manque de connaissances.

Sullivan et al. (2017) ont compilé des données pan tropicales de 360 parcelles situées dans des « forêts anciennes à canopée fermée structurellement intactes », comme celle de la Guyane. Ils concluent que les relations entre diversité des espèces d'arbres et stocks de carbone aérien varient en fonction des échelles considérées. Par exemple, elles sont absentes à échelle pantropicale, faibles (Asie) ou absentes (Amazonie et Afrique) à échelle continentale et faiblement positives à échelle parcellaire.

Lors de son étude sur la diversité des écosystèmes forestiers de Guyane, Guitet (2015) a montré que les écosystèmes qui stockaient le plus de C (aussi bien dans les sols que dans la biomasse) correspondaient à ceux présentant une forte diversité alpha⁷ (

Figure 24 ; la diversité alpha figure en abscisse).

⁷ Diversité observée entre différents relevés à l'intérieur d'une même zone. Elle diffère de la diversité bêta (inter-zone) et gamma (globale).

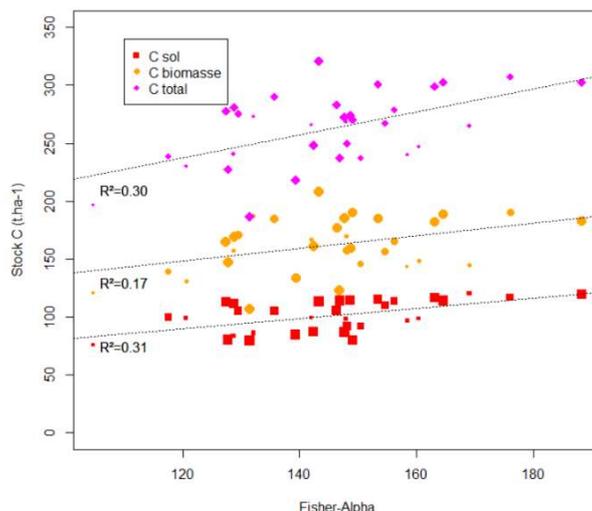


Figure 24 : Stocks de CA, COS et de C total en fonction de la biodiversité alpha (Guitet, 2015)

Il décrit ainsi 4 grands cas de figure en Guyane : les « forêts de montagne très diversifiées avec de forts stocks de COS », les « forêts de plateaux avec de forts stocks de C total et d'importantes ressources en bois », les « forêts de plaines à forte originalité mais faible diversité floristique, faible ressource en bois et faible stock de COS » et les « situations intermédiaires sur les reliefs hétérogènes des collines et vallées ».

Cependant, l'auteur remet en question l'implication de la diversité alpha dans les résultats des stocks. Il soulève en effet que la Guyane a connu une stabilité climatique et géomorphique à l'origine du maintien d'un grand nombre d'espèces. Or, cette stabilité aurait également permis la mise en place de Ferralsols profonds, très argileux et favorables à l'accumulation de C dans les sols et au développement de fortes biomasses aériennes. Ainsi, la stabilité pédoclimatique globale sur le très long terme permettrait d'expliquer en même temps l'accumulation d'espèces différentes et de CA, mais ne permettrait pas de démontrer l'effet de la diversité des espèces floristiques sur les stocks de CA (Guitet, 2015).

3.1.4. L'abondance en lianes

Bien que rarement prises en compte dans les calculs en raison de la difficulté de mesurer/estimer leur biomasse, les lianes contribuent au stock de carbone aérien forestier. Par ailleurs, elles jouent un important rôle sur la mortalité et la croissance des arbres en exerçant une compétition sur les ressources nutritives, qui peut contribuer à réduire leurs stocks de carbone. Phillips et al. (2002) ont analysé la relation entre le niveau d'infestation en lianes et la mortalité des arbres sur 13 sites amazoniens. Selon les auteurs, les lianes seraient en effet impliquées dans 39,6% (+/-30%) des cas de mortalité.

La Guyane a fait l'objet de plusieurs études sur l'impact des lianes sur ses forêts. L'étude de Tymen et al. (2015) a été réalisée sur le site de Nouragues, constitué de 3 types de végétation: forêt à haute canopée, forêt infestée par les lianes, bosquets de bambous. Les auteurs ont mesuré plusieurs indicateurs grâce à des relevés de terrain et à la télédétection :

	Forêt à haute canopée	Forêt infestée de lianes
Biomasse des troncs (tMS/ha)	414 ± 13	172 ± 10

Biomasse des lianes (tMS/ha)	2,89 ± 0,45	2,93 ± 0,66
Mortalité des arbres (%)	1,51 ± 0,09	3,03 ± 0,36

Tableau 4 : Indicateurs mesurés par Tymen et al. (2015)

Tymen et al. (2015) ont montré que la biomasse aérienne de la forêt infestée était 58 % plus faible que celle de la forêt intacte, avec une mortalité plus élevée comme le soulignaient Phillips et al. (2002) à l'échelle tropicale. En plus d'augmenter la mortalité, les lianes marqueraient un arrêt dans la dynamique de succession des arbres, empêchant les petits arbres de grossir et limitant les stocks de CA (Figure 25).

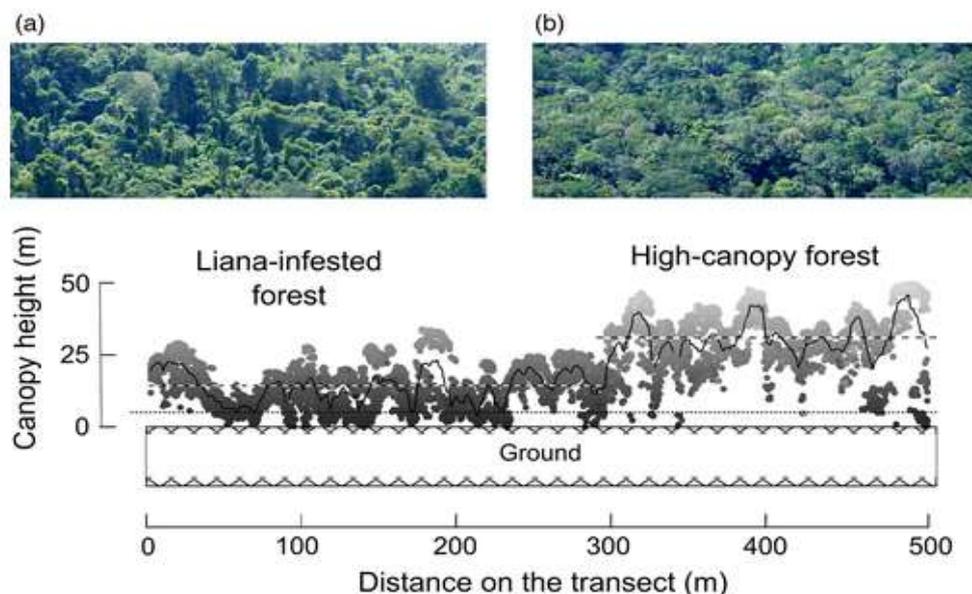


Figure 25 : Photographies aériennes et hauteur de la canopée des sites « forêt infestée de lianes » et « forêt à haute canopée » de l'étude de Tymen et al. (2015)

Toutes les forêts tropicales et gyanaises ne sont pas infestées par les lianes de la même façon. Notamment, les forêts anciennes comme celles de la Guyane présentent des niveaux d'infestation relativement bas par rapport à des forêts récentes. Les données récoltées sur les forêts de Paracou et de Gigante Peninsula, au Panama, pour la calibration du modèle d'interactions arbres/lianes de Di Porcia e Brugnara et al. (2019), ont montré que les lianes constituaient seulement 1,1 % de la biomasse aérienne forestière de Paracou (contre 8,2 % à Gigante) et qu'elles n'avaient pas d'effets significatifs sur les stocks de C ni sur les flux.

En travaillant sur le même modèle, Meunier et al. (2021) ont par ailleurs montré que l'eau était le facteur déterminant de la compétition entre les arbres et les lianes, et que ce phénomène apparaissait seulement pendant la saison sèche sur la forêt humide de Paracou (contrairement aux forêts sèches du Panama, où l'effet était perceptible toute l'année).

Ainsi, la présence de lianes peut être à l'origine d'importantes baisses des stocks de CA, en augmentant la mortalité et en bloquant l'évolution de la forêt à des stades précoces (petits arbres). La forêt gyanaise reste cependant relativement peu touchée par rapport à d'autres sites d'Amazonie. De plus, le site forestier gyanais étudié par les auteurs Tymen et al. (2015) précédemment cités correspond à un faciès très particulier. En revanche, la connaissance de

cet effet reste un enjeu important, notamment au vu du risque d'augmentation de la présence des lianes sous l'effet des perturbations anthropiques.

3.2. Quelles sont les sources de variabilité temporelle des stocks de C ?

3.2.1. Variabilité intra et inter-annuelle

La Guyane est marquée par deux saisons bien distinctes : une saison sèche d'août à novembre et une saison des pluies de décembre à juin. Si les températures restent plutôt stables toute l'année autour de 27°C, les précipitations passent de 700 mm au mois de mai à moins de 50 mm au mois de septembre (**Erreur ! Source du renvoi introuvable. ; Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Les variations saisonnières de conditions du milieu ont des conséquences sur la dynamique des forêts. Le modèle de Wagner et al. (2014 ; 2016), construit à échelle pantropicale et mobilisant des données de Paracou, a mis en évidence que les précipitations ainsi que le rayonnement solaire (parmi ces deux facteurs ainsi que la température et la teneur en eau relative du sol) étaient les principaux facteurs saisonniers de variation de croissance des arbres, expliquant respectivement 19,8 % et 16,3 % des variations observées.

Or les variations de stocks de carbone se calculent en prenant en compte les entrées de C (la croissance et le recrutement) et les sorties (la mortalité). Ainsi, cette étude, sans données sur la mortalité ni sur le recrutement, n'a pu conclure sur l'effet des précipitations et du rayonnement solaire sur les stocks.

La connaissance des variations de croissance et de mortalité des arbres en fonction de facteurs climatiques reste primordiale, notamment lorsqu'elle est mise au regard de l'évolution du climat que nous connaissons. Comme évoqué précédemment, depuis 1970, les températures annuelles mesurées en Guyane varient de quelques dixièmes de degrés Celsius par an, avec une augmentation moyenne de 1°C depuis 1970 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Bien que marquée par le phénomène climatique El Niña, la Guyane est touchée depuis 2 ans par une pluviosité excessive (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Dans le cadre du projet Climfor (Cadre 3) et grâce à des données récoltées depuis 20 ans, Aubry-Kientz et al. (2015b) ont montré que trois facteurs climatiques annuels étaient impliqués de façon significative dans les variations de croissance et de mortalité annuelles des arbres du site de Paracou : la sécheresse, la saturation des sols en eau et la température (parmi ces facteurs ainsi que l'évapotranspiration, les précipitations, la température moyenne, la pression de vapeur saturante, le rayonnement, la couverture nuageuse et la fréquence des jours de pluie). Les auteurs se sont ainsi servis des dynamiques observées afin de modéliser les stocks de CA au vu des scénarios climatiques annoncés par les rapports du GIEC (Aubry-Kientz et al., 2019).

Aussi, la variabilité spatiale des stocks en fonction des températures peut être utilisée comme facteur prédictif de la biomasse aérienne au regard du changement climatique. Par exemple, Sullivan et al. (2020) ont produit une carte des variations de stocks de carbone aérien des forêts tropicales en réponse à l'augmentation de la température de l'air de 2°C. Cette carte a été construite grâce à l'observation des stocks actuels dans des zones plus ou moins chaudes.

Ces deux études, présentées à la fin de cette partie, permettent d'appréhender quelle sera la réponse des capacités de stockage de C de l'écosystème forestier guyanais aux variations de conditions du milieu à long terme engendrées par les activités anthropiques.

Cadre 3 : Le projet Climfor

Le projet Climfor s'est déroulé entre 2011 et 2013. Il a été mené par l'UMR EcoFoG en collaboration avec l'ONF, l'UMR Ecologie et Ecophysiologie Forestières, l'Université de Liège et le laboratoire Evolution et Diversité Biologique, et financé par la FRB (Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité). Il a eu pour but de modéliser l'effet du changement climatique sur quatre services écosystémiques de la forêt guyanaise : la diversité végétale, la diversité fonctionnelle, le stockage de carbone et la ressource en bois. Il a notamment permis le financement des études dont les résultats sont présentés dans cette partie (Aubry-Kientz et al., 2015b).

3.2.2. Effets de la sécheresse

Une sécheresse peut être définie comme une période pendant laquelle la disponibilité de l'eau dans le sol devient très inférieure à la valeur normale de la zone géographique. Selon les années, la sécheresse saisonnière est particulièrement intense et se distingue. A l'échelle des forêts tropicales mondiales, Phillips et al. (2009) et Feldpausch et al. (2016) ont montré que les grandes sécheresses de 2005 et de 2010 ont engendré des pertes de $1,2$ à $1,6 \cdot 10^9$ tC et de $1,1 \cdot 10^9$ tC (au total) respectivement, dues à un déclin de la productivité de biomasse et à une augmentation de la mortalité.

En effet, lors d'une diminution de la disponibilité en eau dans le sol perçue par des récepteurs racinaires, les racines envoient des messages jusqu'aux feuilles afin de fermer les stomates pour limiter l'évapotranspiration. Ceci a des répercussions sur la photosynthèse et donc sur la croissance.

Les événements de surmortalité lors d'une sécheresse sévère peuvent être immédiats ou s'observer avec un léger retard (Rowland et al., 2015). L'évapotranspiration, moteur de la montée de la sève des racines vers les feuilles, crée une forte tension qui finit par provoquer des bulles d'air. Ces bulles s'accumulent dans les vaisseaux transporteurs de sève et bloquent sa bonne circulation. On parle « d'embolie » (Figure 30). Les parties hautes de l'arbre ne sont alors plus alimentées et l'arbre meurt. A plus long terme, les arbres qui ne photosynthétisent pas ou trop peu pendant les sécheresses puisent dans leurs réserves en sucres. Ils finissent par les vider et mourir de famine (Doughty, 2015 ; O'Brien, 2014).

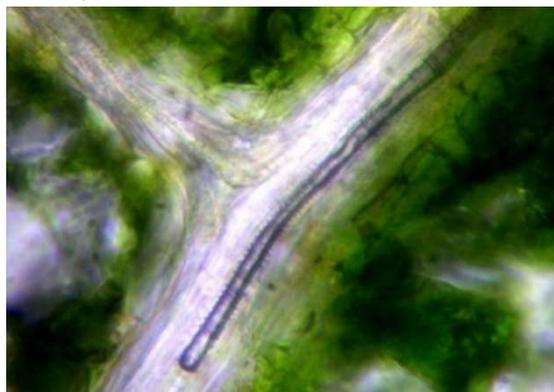


Figure 26 : Vue microscopique d'une embolie dans un faisceau (source : Sécheresse et embolie gazeuse chez les arbres | INRAE INSTIT)

Globalement, la Guyane a été peu touchée par les sécheresses de 2005 et de 2010, probablement du fait d'un effet tampon de l'océan (C. Stahl, chercheur en écophysiologie forestière à l'INRAe). De plus, le site de Paracou est un site particulièrement humide par rapport à d'autres sites forestiers amazoniens. Il ne réagit pas de la même façon à la sécheresse.

Pour illustrer cela, Longo et al. (2018) ont modélisé la réponse des sites de Paracou et de Tapajos, au Brésil, à des scénarios de sécheresse. Les auteurs ont utilisé un modèle prédictif de l'effet des conditions climatiques sur la biomasse, la structure et la composition des forêts. Alors que le site sec de Tapajos perdait de la biomasse en raison de la forte mortalité des arbres lorsque la réduction moyenne des précipitations dépassait 15 %, les auteurs ont observé que le site humide de Paracou était insensible aux scénarios testés.

Dans une autre étude, Aubry et al. (2015b) ont montré que la sécheresse observée à l'échelle interannuelle sur le site de Paracou diminuait la mortalité des arbres, allant en contradiction avec les observations faites à l'échelle pantropicale. Si les conditions expérimentales sont avancées pour expliquer cela (faibles variations de pluviosité mesurées et recul sur 2 ans seulement), la sécheresse participerait néanmoins à diminuer l'engorgement des sols en eau sur le site qui, combiné aux vents, serait à l'origine de chablis en Guyane (3.1.2.).

Les auteurs ont également observé une diminution de la croissance. Ils ne concluent pas sur l'effet de la diminution de la croissance et de la mortalité des arbres sur les stocks de C. En revanche, les modélisations montrent une meilleure résistance à la sécheresse des espèces à haute densité de bois et à petit diamètre. En effet, ils possèdent des faisceaux conducteurs de sève plus fins, ce qui limite l'effet d'embolie (Levionois et al., 2021). Ainsi, à terme, la sécheresse sur le site de Paracou pourrait être à l'origine d'une diminution de la biomasse aérienne, non pas à cause d'une surmortalité mais à cause d'une modification de la structure forestière.

3.2.3. Effet de l'augmentation des précipitations et des températures

Sur le site de Paracou, Aubry et al. (2015b) ont montré qu'il existait une corrélation positive entre l'augmentation des précipitations annuelles et les taux de mortalité des arbres. En effet, comme vu précédemment, la combinaison de sols saturés en eau et du vent serait à l'origine de chablis (Ferry et al., 2010). A partir de 3 100 mm/an de précipitations, l'ouverture de la canopée par les chablis permettrait ainsi la croissance rapide d'espèces exigeantes en lumière mais à plus faible densité de bois, faisant chuter les stocks de biomasse et de CA (Ferry et al., 2010) (Figure 27).

En outre, Aubry et al. (2015b) ont montré que l'augmentation des températures annuelles entraînait une diminution de la croissance des arbres. Avec la température, l'efficacité de la photosynthèse (donc l'entrée de carbone dans la plante via le CO₂) augmente doucement. Au-delà d'un certain seuil, la vitesse de réaction des molécules est telle qu'elle conduit à des dommages dans la structure des enzymes, réduisant finalement leur activité (Fitter and Hay, 2001 ; Lloyd and Farquhar, 2008). En Guyane, de nombreuses heures de la journée sont déjà au-dessus du seuil limite, expliquant les observations d'Aubry et al. (2015b). Jusqu'à 26°C de température annuelle moyenne, l'augmentation de la cinétique de la photosynthèse permettrait la croissance des arbres et l'augmentation de la biomasse et des stocks de CA. Au-delà de 26°C, la photosynthèse deviendrait fortement perturbée, ralentissant la croissance et ainsi l'augmentation de la biomasse et des stocks de CA (Figure 27).

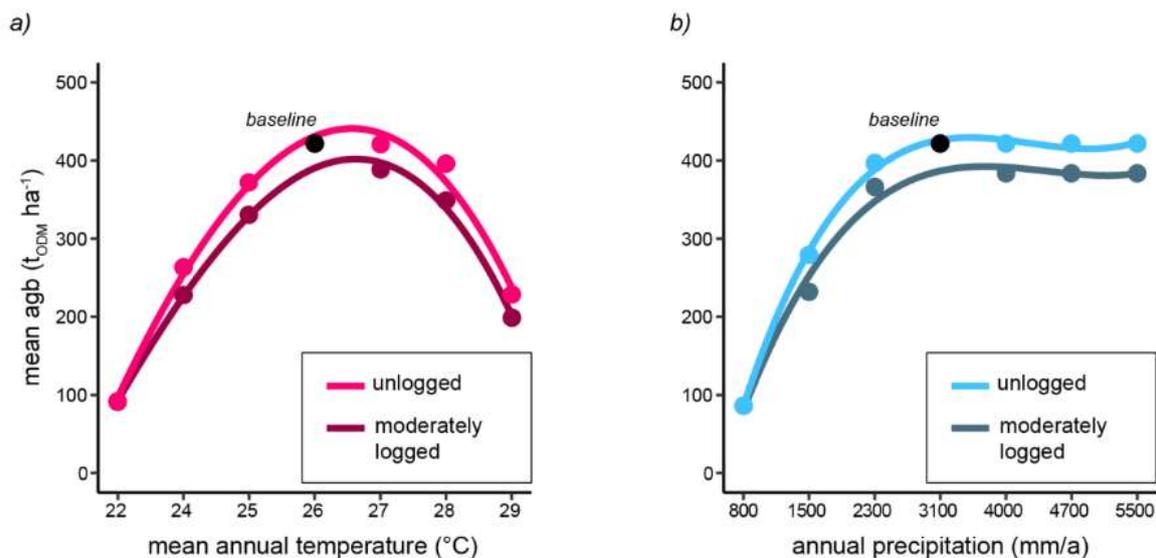


Figure 27 : Biomasse aérienne forestière en fonction des températures annuelles moyennes et des précipitations annuelles (Hilner et al., 2021)

AGB : Aboveground Biomass ou biomasse aérienne ; ODM : Organic Dry Matter ou matière sèche organique.

3.2.4. Modélisations de l'effet du changement climatique sur le CA

- Par l'étude de la variabilité spatiale des stocks

L'étude de Sullivan et al. (2020) a réuni un grand nombre de chercheurs pour construire une carte des variations de stocks de CA des forêts tropicales du monde en réponse à l'augmentation de la température de l'air de 2°C. Pour la construire, les scientifiques ont observé les stocks actuels dans des zones plus ou moins chaudes et utilisé la variabilité spatiale des stocks en fonction des températures comme facteur prédictif de la biomasse aérienne.

D'après les auteurs et de manière générale, l'augmentation de la température à l'échelle du globe entraînerait une baisse des stocks, avec 9,1 tC/ha perdus en moyenne par degré Celsius et un impact plus important dans les forêts des zones les plus chaudes. Selon les prédictions, la forêt guyanaise serait particulièrement affectée (Figure 32), avec une perte de 30 à 80 tC/ha de la côte à l'intérieur des terres.

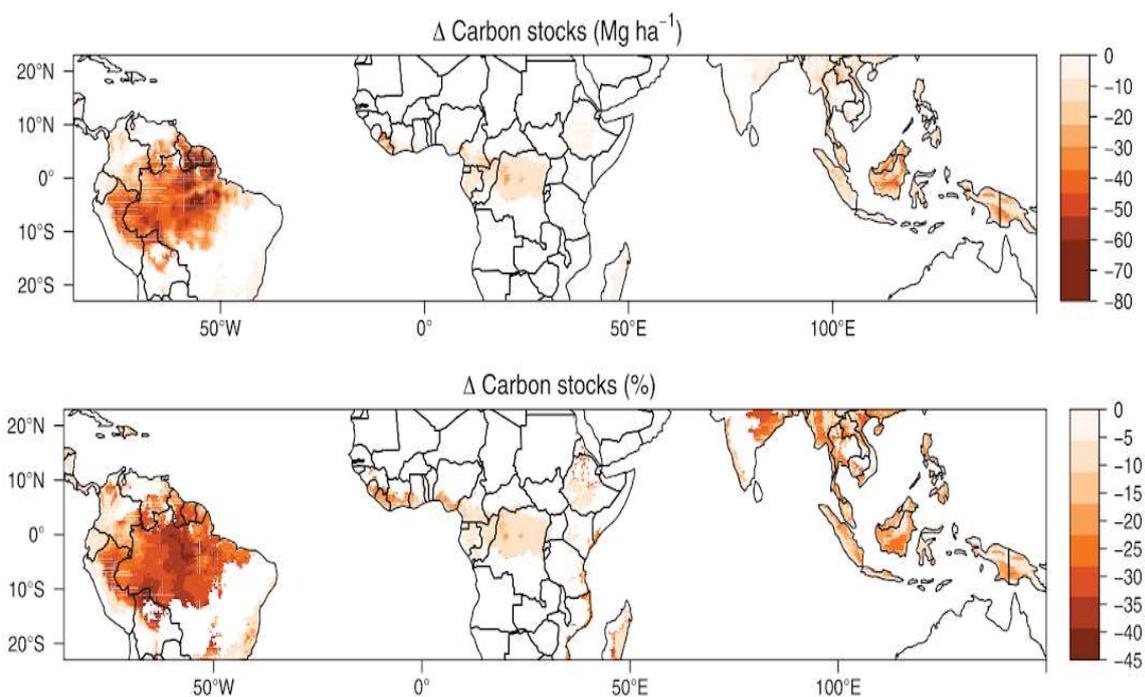


Figure 28 : Changement à long terme des stocks de carbone (aérien) dû aux seuls effets de la température pour une augmentation de la température de l'air à la surface du globe de 2°C (Sullivan et al., 2020)

- Par la modélisation de l'effet des conditions climatiques actuelles appliqué aux conditions climatiques futures

Aubry et al. (2019) ont appliqué les effets observés de la disponibilité en eau et de la température sur les dynamiques de croissance et de mortalité depuis 20 ans sur le site de Paracou (Aubry et al., 2015b) aux conditions climatiques annoncées selon 3 scénarios prédictifs du GIEC (Tableau 5) : un scénario optimiste (RCP 2,6), un scénario pessimiste (RCP 8,5) et un scénario intermédiaire (voir cadre 4). Le scénario optimiste correspondait à une augmentation de 2°C d'ici 2100, comme il a été modélisé dans l'étude de Sullivan et al. (2020). Le témoin représentait le climat actuel qui ne serait pas affecté par le changement climatique.

Modèle	Scénario de réchauffement	Stocks de biomasse aérienne (tC/ha)	Croissance moyenne (mm/2 ans)	Taux de mortalité (%/2 ans)
Modèle 1	Témoin	230	0,25	2
	Optimiste	225	0,22	1,8
	Intermédiaire	225	0,12	1,6
	Pessimiste	220	0,16	1,4
Modèle 2	Témoin	197,5	0,24	2
	Optimiste	194	0,22	1,9
	Intermédiaire	189	0,8	1,8
	Pessimiste	184,5	0,16	1,7

Tableau 5 : Résultats de l'effet des 3 scénarios climatiques testés par Aubry et al. (2019)

NB : Les auteurs ont également testé l'effet de 2 modalités de vigueur des arbres sur l'évolution des stocks de carbone aérien. Dans le modèle 1, la vigueur est une caractéristique propre à l'arbre et n'est

pas impactée par le changement climatique. Dans le modèle 2, la vigueur est sous contrôle des facteurs environnementaux.

Si le scénario optimiste correspond au scénario 2.6 du GIEC et le scénario pessimiste au 8.5, présentés ci-après, le scénario intermédiaire n'est pas explicité

Le modèle d'Aubry et al. (2015b) montrait que l'augmentation des températures ainsi que la baisse des précipitations diminuaient la croissance mais aussi la mortalité des arbres. Or, la mise en application de ces effets aux futurs scénarios climatiques annoncés par le GIEC a montré que la diminution de croissance serait plus importante que la diminution de mortalité (Tableau 55). Si les résultats annoncés par Aubry et al. (2019) modèrent très nettement ceux annoncés par Sullivan et al. (2020) (scénario optimiste par rapport au scénario témoin), il résulterait quand même une diminution 3,5 à 5 tC/ha des stocks de CA par rapport au climat actuel, soit 28 à 40,5 millions de tC en moins stockées dans les forêts guyanaises.

Cadre 4 : Les scénarios de réchauffement climatique du GIEC (5^e assessment report)

Dans son 5^e rapport publié en 2014, le GIEC a défini 4 profils d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, appelés « RCP (Representative Concentration Pathways) 2.6, 4.5, 6.0 et 8,5 », du plus optimiste au plus pessimiste. Le numéro correspond à la valeur du forçage radiatif, correspondant à la différence entre la puissance radiative reçue et émise par la terre, qui sera obtenue en 2100. Par exemple :

- RCP 2.6 (optimiste) : Forçage radiatif égal à 2,6 W/m² en 2100.
- RCP 8.5 (pessimiste) : Forçage radiatif supérieur à 8,5 W/m² en 2100.

Depuis son 6^e rapport publié en 2021, le GIEC a associé ces scénarios à une nouvelle typologie désignant leurs conséquences humaines, politiques et économiques.

- Effet du changement climatique sur l'exploitation forestière

En sus, le modèle établi par Hiltner et al. (2021) a montré quel serait l'effet de l'exploitation forestière au regard des mêmes scénarios climatiques. L'exploitation forestière est modélisée selon un cycle de coupe de 65 ans correspondant à celui pratiqué en Guyane et une intensité d'exploitation de 36 m³ de bois/ha (supérieure à celle pratiquée en Guyane, qui est de 20m³/ha) (Figure 29).

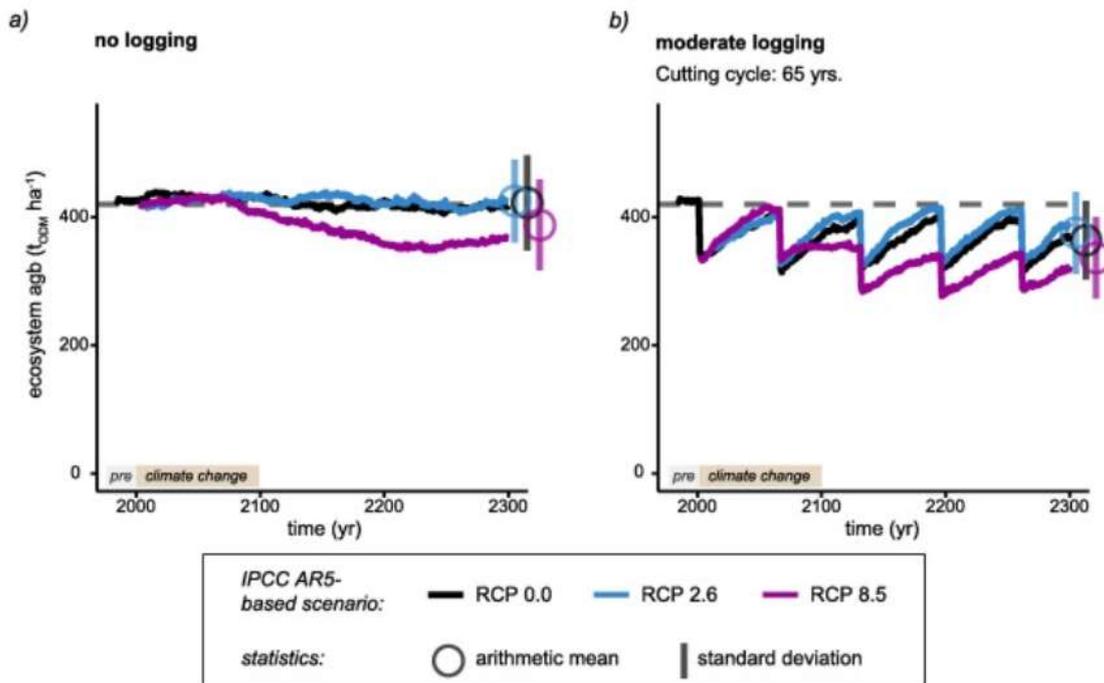


Figure 29 : Résultats de l'effet des 3 scénarios climatiques testés par Hiltner et al. (2021) pour une forêt non exploitée (à gauche) et exploitée (à droite)

Quel que soit le scénario et avec les conditions d'exploitation forestière guyanaise actuelles, la biomasse aérienne n'aurait pas le temps de se régénérer. Ceci induirait une dégradation progressive des stocks de CA et imposerait un temps de repos plus long pour répondre aux enjeux de conservation des stocks, au détriment, donc, des approvisionnements en bois.

- Synthèse

Sullivan et al. (2020) annoncent un scénario très pessimiste pour le devenir des stocks de C contenus dans la biomasse forestière guyanaise, nuancé par les travaux d'Aubry et al. (2019) menés avec les données de Paracou.

Bien souvent, les travaux scientifiques sur l'étude des conséquences du changement climatique ne prennent pas en compte toutes les variables. Les prévisions de Sullivan et al. (2020) sont basées sur la température uniquement et ne tiennent pas compte des changements de précipitations (pour lesquels les modèles de changements futurs sont incertains), ce qui peut expliquer la différence de résultats observés avec l'étude d'Aubry et al. (2019).

En revanche, aucune des études précédemment citées ne prend en compte l'augmentation du CO_2 atmosphérique et son possible effet sur la croissance des plantes. Dans leur modèle sur l'effet des grandes sécheresses appliqué à Paracou et une forêt brésilienne, Longo et al. (2018) ont simulé des concentrations élevées de CO_2 atmosphérique. Ils montrent une accumulation de la biomasse sur les deux sites supérieure de 5 à 60 % à la biomasse actuelle.

Là encore, le modèle ne tient pas compte de l'effet de la limitation des nutriments tels que le phosphore sur la photosynthèse dans les forêts tropicales. Ainsi, l'accumulation de biomasse du fait d'une plus grande facilité à assimiler le C en abondance dans l'atmosphère serait finalement limitée par des facteurs biophysiques. Nous aurions déjà atteint le plateau de croissance de biomasse (B. Hérault).

Enfin, Aubry et al. (2015) ont mesuré l'effet de la pluviosité annuelle sur la mortalité des arbres. Les auteurs pointent le manque de connaissances sur l'effet de l'augmentation des événements climatiques extrêmes et notamment des très fortes pluies.

Ainsi, la prédiction de l'évolution des stocks de C contenus dans les forêts reste un domaine extrêmement complexe dans lequel beaucoup de variables mal connues sont à prendre en compte.

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

Un changement d'usage des sols entraîne des conséquences immédiates sur les stocks de carbone aérien. La suppression de l'état forestier en particulier entraîne une perte d'un important stock contenu dans la biomasse aérienne des arbres (entre 75 et 250 tC/ha).

La mise en eau du barrage de Petit-Saut en 1994 a entraîné la conversion de 30 000 ha de forêt en zones humides. Amortie sur 22 ans, elle représentait encore une importante part des changements d'usage des sols annuels entre 1990 et 2012 (IGN, 2015 d'après Lefèbvre et Verger, 2014). Aujourd'hui, l'extension de l'agriculture est cependant la première cause de changement d'usage des sols en Guyane (IGN, 2015).

4.1. De la forêt vers les zones humides : le cas du barrage de Petit-Saut

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 forêt et de 10 millions de tonnes de carbone (Galy-Lacaux et al., 1997). 58,2 % étaient contenus dans la biomasse aérienne des arbres, dont 56,2 % dans les troncs et 2 % dans les feuilles.

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, 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 %⁸ seulement du C des troncs a été perdu. C'est pourquoi on retrouve des arbres encore debout dans la retenue (Figure 30).

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

Ainsi, sur 5,8 millions de tonnes de CA submergés lors de la mise en eau, 1,36 millions ont été perdues 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 2 « Bilan des émissions de gaz à effet de serre »).

4.2. De la forêt vers l'agriculture

Aujourd'hui, l'extension de l'agriculture est la première cause de changement d'usage des sols en Guyane (IGN, 2015). Entre 2011 et 2019, la Surface Agricole Utile a augmenté de 10 000 ha, passant de près de 24 000 ha à près de 34 000 ha (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

L'impact du passage de la forêt vers le milieu agricole sur le COS a fait l'objet de plusieurs travaux menés sur le territoire. Il n'en existe pas sur le carbone aérien. En effet, il est simplement considéré que le carbone forestier est entièrement éliminé (par le feu ou la dégradation de la matière organique) et que la perte de carbone équivaut à la différence de stock entre l'état forestier et agricole.

En revanche, les pratiques utilisées jouent sur les émissions de GES lors de la défriche. En effet, la combustion de la biomasse aérienne mène à des émissions de CO₂ mais également d'autres GES comme le CH₄ et le N₂O (voir annexe 2 « Bilan des émissions de gaz à effet de serre »). De plus, les pratiques de défriche impactent l'évolution du COS. Par exemple, la biomasse aérienne laissée au sol lorsque le brûlis n'est pas utilisé participe à un enrichissement transitoire (cependant court) en carbone dans le sol.

Il existe en Guyane une réelle ambition de valorisation de la biomasse aérienne pour la production d'énergie, soutenue par les pouvoirs publics. Selon les projections de l'Ademe, l'utilisation de la biomasse pourrait représenter 30 % du mixte énergétique du territoire en 2030. Parmi la biomasse utilisée, une partie serait issue de la défriche agricole. Le reste proviendrait de la valorisation des déchets de l'industrie du bois et de la collecte des troncs de la réserve d'eau du barrage de Petit-Saut, complétée par du bois de plantation (Figure 35). Une centrale à biomasse est par ailleurs déjà implantée sur la commune de Cacao.

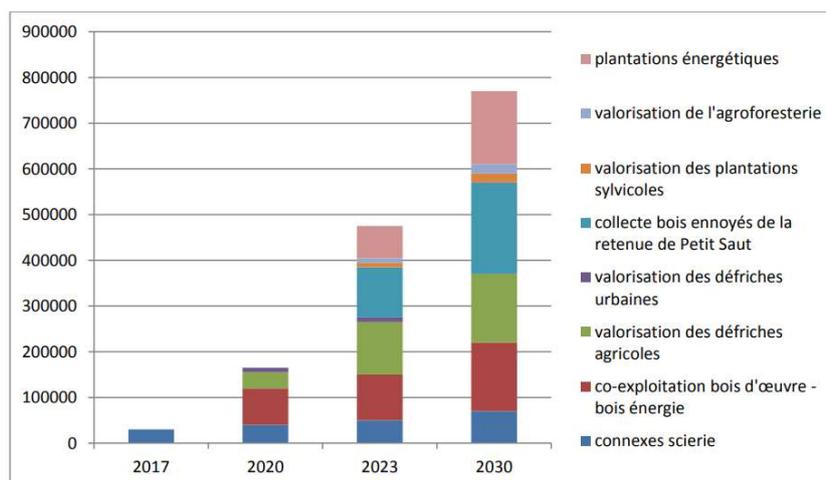


Figure 31 : Gisements de biomasse mobilisables en 2017, 2020, 2023 et 2030 exprimés en tonnes de bois par an selon les projections de l'Ademe (source : Biomasse | L'Ademe en Guyane)

La production d'énergie n'est cependant pas la seule possibilité de valorisation des bois de défriche, et certains acteurs du milieu poussent à ce qu'elle soit le dernier recours. La valorisation en bois d'œuvre est par exemple une autre voie, et à forte valeur ajoutée. Elle n'a cependant pas fait l'objet de bilan C spécifiquement et n'a donc pas été présentée ici.

4.3. Autres changements d'usage

La Guyane accueille actuellement une vingtaine de mines légales (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), principalement destinées à l'exploitation d'or, ou orpaillage. On estime que l'orpaillage a été responsable de la déforestation de 25 000 ha entre 1990 et 2014 (ONF, 2015 ; Rahm et al., 2015 ; Lefèbre et Verger, 2014).

L'impact de l'installation des mines n'a pas fait l'objet de travaux spécifiques sur les pertes de CA liées à la suppression de l'état forestier. En revanche, de nombreux travaux ont étudié les bénéfices de la végétalisation des sites miniers sur le COS et sont décrits dans le rapport consacré au COS.

Chaque année, quelques hectares font également l'objet d'une reforestation, mais ce phénomène reste négligeable à l'échelle du territoire. L'urbanisation progresse d'environ 300 à 400 ha/an sur les forêts.

5. Effets des changements/maintien des pratiques forestières sur les stocks de carbone aérien

Sur une surface de 8,1 millions d'hectares boisés, l'exploitation forestière guyanaise se limite aux 2,4 millions d'hectares du Domaine Forestier Permanent (DFP) (Figure 32). La spécificité de la forêt guyanaise impose de fortes contraintes. En particulier, la topographie très découpée empêche une exploitation sur près de la moitié de la surface des parcelles forestières. De plus, les espèces définies par l'ONF comme exploitables sont très dispersées. Par ailleurs, l'organisme de gestion fixe le prélèvement maximal à 20 m³/ha afin de minimiser la perturbation (ONF, 2014). Il se limite en pratique à 2 à 3 arbres/ha en moyenne.

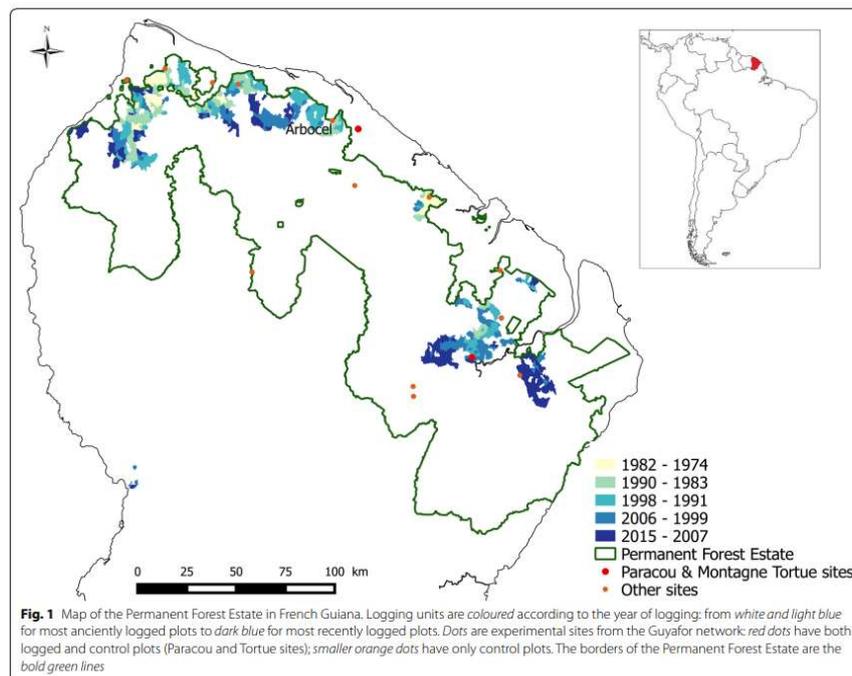


Figure 32 : Carte du domaine forestier permanent de Guyane et zones d'exploitation par période (Piponiot-Laroche et al., 2018)

NB : les sites pointés correspondent à ceux du dispositif Guyafor

Dans le Domaine Forestier Permanent guyanais, l'activité d'exploitation forestière a déjà engendré des émissions comprises entre 120 et 1 330 x 10⁶ tC sur la période 1974-2012 (Piponiot-Laroche et al., 2016b). Or, avec l'augmentation démographique, l'exploitation forestière est susceptible de s'intensifier, et ses émissions, d'augmenter. C'est pourquoi de nombreux travaux ont été réalisés afin d'identifier les pratiques permettant d'assurer une exploitation plus durable, notamment en réduisant son impact sur les pertes de carbone aérien. La majorité de ces travaux ont été conduits sur le site expérimental de Paracou, dont une partie est dédiée à l'étude de l'impact de l'exploitation forestière.

5.1. Effets de l'intensité de l'exploitation forestière

L'intensité d'exploitation forestière peut être définie comme le volume de bois (exprimé en m³ de bois) ou le nombre d'arbres exploités par unité de surface. En Guyane, afin de garantir un renouvellement de la ressource, elle est limitée à 5 arbres/ha, soit 20 m³/ha (ONF, 2014).

De manière logique, plus l'intensité de l'exploitation forestière est élevée, plus les pertes de carbone aérien au moment du prélèvement sont élevées. De plus, l'intensité de l'exploitation joue sur la capacité de la forêt à retrouver ses caractéristiques initiales, dont son stock de carbone. On appelle cela la résilience. A l'échelle amazonienne, Rutishauser et al. (2015) ont évalué que l'intensité d'exploitation forestière était le meilleur prédicteur du temps de reconstitution des stocks de carbone, comparé à la densité de la population d'arbres et les précipitations moyennes annuelles et saisonnières.

Blanc et al. (2009) ont étudié l'effet de deux niveaux d'intensité d'exploitation forestière sur les pertes de carbone des parcelles du site de Paracou exploitées en 1984. Les parcelles « plus intensément exploitées » n'ont pas seulement subi plus de prélèvements d'arbres : des techniques d'intensification associées à de l'éclaircie ont également été utilisées. Ces techniques sont appelées TSI pour Timber Stand Improvement.

	Sans TSI (12 parcelles)	Avec TSI (24 parcelles)
Nombres d'arbres prélevés en moyenne	10,4 arbres/ha (32,5 m ³ /ha)	20,6 arbres/ha (53,4 m ³ /ha)
Nombres d'arbres éliminés au-delà du prélèvement ci-dessus		16,6 arbres/ha
Emissions brutes (tC/ha) sur 20 ans	85	142
Temps de régénération de la biomasse forestière	45 ans	>100 ans

Tableau 6 : Schéma expérimental utilisé par Blanc et al. (2009)

L'exploitation « avec TSI » a fait perdre plus de la moitié des stocks de carbone aérien, contre un tiers pour l'exploitation « sans TSI » (Tableau). En 20 ans, les parcelles « sans TSI » avaient retrouvé 80 % de leurs stocks de carbone initiaux. Grâce à un modèle, les auteurs ont montré qu'elles auront besoin de 45 ans pour reconstituer leurs stocks contre 100 ans pour celles exploitées « avec TSI ».

Hiltner et al. (2018) ont modélisé les effets d'une intensité d'exploitation forestière encore plus forte sur la dynamique et la structure de la régénération forestière, sans TSI cette fois-ci. Pour évaluer le temps de régénération, les auteurs ont utilisé un modèle prédictif (FORMIND), associé à des mesures prises sur le site de Paracou permettant de paramétrer le modèle.

D'après les résultats, une exploitation forestière dite « très intensive » double le temps de régénération de la biomasse et donc du carbone aérien forestier par rapport à une exploitation dite « modérée » (Tableau 7).

	Exploitation « très intensive »	Exploitation « modérée »
Nombres d'arbres prélevés en moyenne	306 arbres/ha (116 m ³ /ha)	10 arbres/ha prélevés (39 m ³ /ha)
Temps de régénération de la biomasse forestière	140 à 160 ans	70 à 80 ans

Tableau 7 : Temps de régénération de la biomasse forestière évalués par le modèle FORMIND sur la forêt du site de Paracou subissant 2 intensités d'exploitation forestière (Hiltner et al., 2018)

NB : Attention, l'intensité d'exploitation forestière actuelle est de 20 m³/ha en moyenne en Guyane. Elle tend vers une intensification à 30 m³/ha. Le scénario appelé « modéré » de l'étude est donc déjà intensif par rapport aux pratiques réelles. L'exploitation « très intensive » à 116 m³/ha a été réalisée avec une baisse du diamètre minimum d'exploitation à 10 cm (qui est dans la pratique d'environ 50 cm). Elle n'est pas envisagée en Guyane et correspond donc à un test purement hypothétique.

Ainsi, si ces deux études montrent l'impact du choix de l'intensité d'exploitation forestière sur la quantité de C perdue, elles montrent aussi l'importance du temps de repos entre 2 coupes qui assure une bonne reconstitution de la ressource. En Guyane, ce temps est fixé à 65 ans minimum par l'ONF (ONF, 2014).

L'éclaircie, utilisée par Blanc et al. (2009), entraîne incontestablement des conséquences sur les stocks de C. En revanche, le schéma expérimental utilisé par l'étude ne permet pas de conclure sur l'effet de l'éclaircie indépendamment de la coupe réalisée. Ainsi, le « gain » de C issu du développement des arbres d'intérêt commercial face aux pertes engendrées par l'éclaircie n'est pas connu. Cette technique est cependant très peu utilisée en Guyane et de manière générale dans les forêts tropicales.

5.2. Effet de l'Exploitation à Faible Impact

Indépendamment du bois prélevé, l'exploitation forestière fait l'objet d'une importante perte de matière organique. En effet, l'oubli de grumes, la non utilisation des rémanents⁹ et surtout la destruction d'arbres non exploités lors de la création des pistes d'accès aux parcelles d'exploitations ou de la chute des arbres prélevés sont sources d'importantes pertes. Selon Derroire et al. (2021), l'exploitation conventionnelle de 20 m³ de bois d'œuvre par hectare mènerait à la destruction de 83 m³/ha de bois supplémentaire (rémanents et dégâts d'exploitation incluant les pistes de débardage secondaires mais pas les pistes principales).

L'Exploitation à Faible Impact (RIL pour Reduced Impact Logging) est 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). Les pratiques utilisées peuvent concerner les opérations de pré-récolte (par exemple la

⁹ Parties des arbres exploités ne faisant pas partie des grumes.

planification des pistes), de récolte (l'abattage directionnel), comme celle de post-récolte (la remise en état des pistes de débardage).

De manière générale, dans une étude réalisée dans 7 pays tropicaux (hors Guyane), Ellis et al. (2019) ont calculé que ces techniques pouvaient réduire de 44 % les émissions liées au secteur de l'exploitation forestière tropicale, évaluées à 834×10^9 tCO₂ en 2015.

Dans le cadre du projet GFCLim (voir 5.5.), Derroire et al. (2021) ont repris et développé le modèle développé par Cabon et al. (2015) et Pioniot-Laroche (2016) afin de tester l'impact de plusieurs scénarios de développement du secteur du bois en Guyane en termes de bilan carbone pour la biomasse aérienne (Cadre 5). Les auteurs ont montré que l'Exploitation à Faible Impact permettait de réduire de 50 % les dommages engendrés sur les stocks de carbone aérien de la forêt (Tableau). De plus, les techniques utilisées permettraient d'augmenter l'intensité de l'exploitation forestière dans les forêts naturelles de 20 m³/ha à 30 m³/ha sans en perturber le bilan carbone (Derroire et al., 2021).

	Avec RIL	Sans RIL
Pertes médianes de carbone (tC/ha)	14,8 [5,1 ; 30,5]	29,4 [15,8 ; 46,8]

Tableau 8 : Pertes médianes de carbone d'une exploitation de 30 m³/ha avec et sans RIL (Derroire et al., 2021)

Les valeurs mentionnées entre crochets sont les valeurs extrêmes calculées.

Cadre 5 : Un outil de bilan carbone de l'exploitation forestière...

Plusieurs auteurs ont co-construit, amélioré et utilisé un modèle de calcul du bilan carbone de l'exploitation forestière, en prenant en compte les émissions et le stockage carbone de la biomasse aérienne tout au long de la filière.

Le modèle construit par Cabon et al. (2015) considérait les émissions issues de la décomposition du bois sortis de la parcelle et des dégâts d'exploitation, ainsi que le stockage de carbone dans la biomasse forestière en croissance après le prélèvement. Pioniot et al. (2016) ont retravaillé ce modèle et comptabilisé en plus les émissions dues à la construction des routes, à la déforestation sur les pistes de débardage principales et sur les places de dépôt. Aussi, ils ont pris en compte le stockage de carbone issu de la reconstitution de la biomasse sur ces mêmes sites, après exploitation. Enfin, lorsque Derroire et al. (2021) ont repris et utilisé le modèle dans le cadre du projet GFCLim, les auteurs ont considéré les émissions dites « évitées » (ou substituées) par la valorisation des rémanents d'exploitation et des déchets de scierie dans l'industrie de l'énergie à la place de sources d'énergie fossiles. Enfin, ils ont laissé la possibilité de modéliser une production de bois en plantation et d'en comptabiliser les émissions.

5.3. Land sharing vs land sparing

Le débat « land sharing vs land sparing » (pouvant être traduit en français par « partage des terres » vs « économie des terres ») touche toutes les activités d'exploitation du milieu. Pour rappel, la stratégie de « land sparing » consiste à mener une exploitation intensive sur des surfaces restreintes, laissant de larges zones non exploitées pour la conservation. A l'inverse,

la stratégie de « land sharing » consiste à mener une exploitation de faible intensité, mais sur des surfaces plus grandes.

La stratégie de « land sharing » a souvent été mise en avant, entraînant globalement moins de modifications par rapport à la forêt naturelle. Or certains chercheurs ont alerté sur le risque représenté par l'homogénéisation des forêts sur la biodiversité ainsi que sur la rentabilité des filières d'exploitation forestière au regard des coûts des infrastructures et des dégâts qui y sont liés.

Piponiot-Laroche et al. (2019) ont étudié ces deux stratégies lors d'une étude comparative réalisée sur 9 sites d'Amazonie (dont celui de Paracou) exploités avec une intensité variant entre 10 et 30 m³/ha. Les auteurs ont modélisé la stratégie d'exploitation en fonction de l'objectif défini : maximiser le stock de carbone, maximiser la biodiversité ou maximiser le stock de bois sur pied (Figure 37). On voit que chacun des objectifs correspond à une stratégie d'exploitation plutôt de type « land sparing » (beaucoup de points verts et peu de points rouges) ou de type « land sharing » (beaucoup de points bleus).

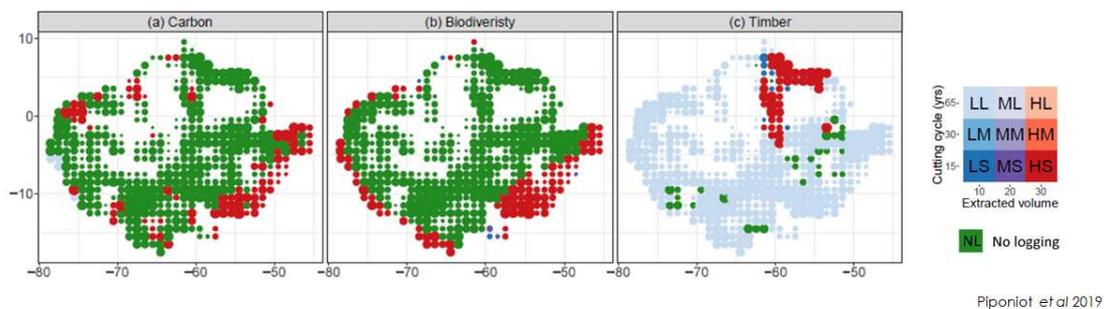


Figure 33 : Modélisation des différentes stratégies d'exploitation forestière à l'échelle de l'Amazonie (Piponiot et al., 2019)

Vert : pas d'exploitation. Rouge : forte exploitation. Bleu : exploitation faible.

Avec des dégâts d'exploitation et d'ouverture des pistes proportionnellement moins conséquents, Piponiot-Laroche et al. (2019) ont conclu que le « land sparing » était la meilleure stratégie d'exploitation. Elle permet d'optimiser le bilan carbone, ainsi que le maintien de la biodiversité. Le « land sharing » serait quant à lui plus intéressant pour la durabilité des approvisionnements en bois.

5.4. Le choix de la forêt exploitée

Si des facteurs liés au choix des pratiques d'exploitation forestière jouent sur les stocks de carbone aérien, des facteurs intrinsèques à la forêt interviennent également. Hérault et Piponiot (2018) ont créé un modèle permettant d'évaluer l'effet du type de forêt et des conditions du milieu sur la dynamique de récupération de la biomasse perdue à la suite de l'exploitation.

Les auteurs concluent que la composition spécifique de la forêt avant la perturbation est l'un des principaux facteurs contrôlant la vitesse de récupération. Notamment, les forêts riches en espèces pionnières ont des taux de récupération plus lents que les assemblages d'espèces de fin de succession. C'est pourquoi les forêts fortement perturbées et les forêts secondaires,

composées de beaucoup d'espèces pionnières, sont moins capables de faire face à de nouvelles perturbations. Les nouvelles perturbations arrivent comme une « répétition », ce qui peut donc conduire un « épuisement » de la forêt et ainsi à une mauvaise résilience (C. Stahl, chercheur en écophysiologie forestière à l'INRAe).

Si les conditions du milieu (pente, bas-fond) impactent très peu la dynamique de reconstitution de la biomasse, les auteurs mettent également en évidence l'impact des conditions climatiques au moment de la repousse. D'après le modèle établi, les parcelles subissant une sécheresse modérée à forte durant la saison sèche retrouvent leurs stocks initiaux en moins de 60 ans après l'exploitation. En outre les parcelles subissant de fortes précipitations pendant la saison humide atteignent une valeur plateau inférieure aux stocks de carbone initiaux, n'impactant pas le temps de récupération mais plutôt la capacité de la forêt à rétablir son stock initial.

5.5. Quel meilleur scénario d'exploitation forestière en Guyane pour le maintien des stocks de carbone aérien ? Le projet GFclim

Le projet GFclim (Gestion forestière et changement climatique) est un projet important mené en Guyane par l'UMR EcoFoG en collaboration avec l'ONF entre 2017 et 2019. Il avait pour objectif d'apporter des pistes d'action pour l'adaptation des modes d'exploitation actuels de la forêt aux enjeux climatiques.

Dans le cadre de ce projet, le bilan carbone construit par Cabon et al. (2015) et amélioré par Pioniot et al. (2016) et Derroire et al. (2021) a été utilisé afin de tester l'impact de plusieurs scénarios d'exploitation forestière sur le bilan, sur une période prospective allant de 1974 à 2088 (Hérault et al., 2020). Parmi ces scénarios, on retrouvait le « scénario historique », représentatif de l'exploitation menée en Guyane depuis une quinzaine d'années, ainsi que divers scénarios proposant des évolutions dans les pratiques (dont celui présenté en Tableau 9).

	Scénario « historique »	Scénario « Plantation en augmentation de la récolte »
Origine bois d'œuvre	Forêt naturelle	Forêt naturelle et plantations
Objectif de production annuelle	80 000 m ³	200 000 m ³ (dont 120 000 m ³ par les plantations lorsqu'elles arriveront à terme)
Intensité exploitation	20 m ³ /ha	20 m ³ /ha
Valorisation des connexes d'exploitation	Non (seule une partie des déchets issus du sciage utilisés en production d'énergie)	Oui (production d'énergie)

Tableau 9 : Exemple de deux scénarios de développement de la filière bois, choisis et étudiés dans le cadre du projet GFclim (Hérault et al., 2020)

NB : Pour les plantations du scénario « Plantation en augmentation de la récolte », les premières plantations commencent à produire 30 ans après le début du scénario.

Les auteurs montrent que le scénario « historique » (production de 80 000m³ de bois d'œuvre par an) est celui qui présente le moins bon bilan en fin de période prospective (Figure 38). Le scénario « plantation en augmentation de la récolte » (production de 200 000m³ de bois d'œuvre par an), combinant augmentation de la récolte de bois d'œuvre, récolte du bois énergie et développement des plantations en complément de la forêt naturelle, conduit au meilleur bilan carbone, si les émissions évitées par l'utilisation du bois à la place d'un autre matériau et en substitution d'énergie fossile pour la production d'énergie sont prises en compte. Ce scénario est aussi celui qui entraîne le plus d'émissions carbone dans les premières décennies, celles-ci étant ensuite compensées par la forte capacité de stockage de l'écosystème après exploitation.

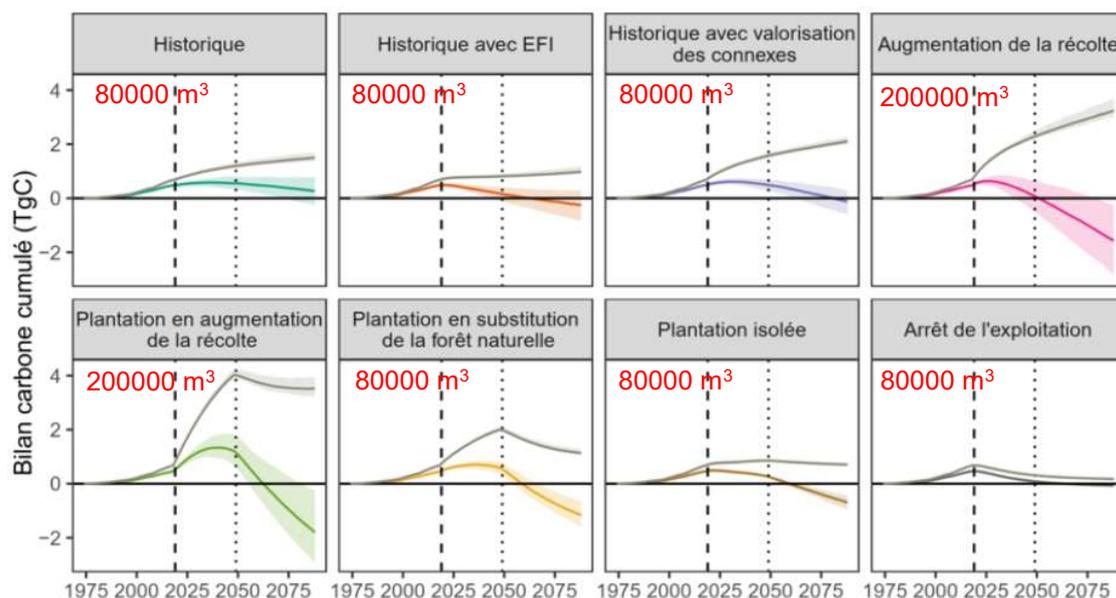


Figure 34 : Bilan carbone cumulé sur la période 1974 - 2088 pour tous les scénarios du projet GFclim (Hérault et al., 2020)

NB : Les chiffres en rouge correspondent aux volumes de bois annuellement produits pour chaque scénario. Dans les graphiques, les valeurs positives correspondent à des émissions de C.

Cependant, si on ne considère pas les émissions « évitées » telles qu'expliquées en Cadre 5 (courbes grises de la figure 38), le scénario « plantation en augmentation de la récolte » devient le pire scénario. Il est à noter que lorsque les émissions « évitées » sont prises en compte, on considère que le bois est utilisé pour la production d'électricité en remplacement du pétrole -la situation guyanaise actuelle étant que l'électricité est majoritairement issue de ce type d'énergie fossile. Lorsque les émissions « évitées » ne sont pas prises en compte, c'est comme si l'électricité produite en Guyane était issue à 100 % d'une énergie verte, presque neutre en carbone (solaire, éolien, etc.). A moyen terme, la situation guyanaise devrait évoluer vers une combinaison de ces deux situations (Derroire et al., 2021).

Bibliographie

- Aguilos, M., Hérault, B., Burban, B., Wagner, F., & Bonal, D. (2018). What drives long-term variations in carbon flux and balance in a tropical rainforest in French Guiana? *Agricultural and Forest Meteorology*, 253–254, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.009>
- Aguilos, M., Stahl, C., Burban, B., Hérault, B., Courtois, A., Coste, S., Wagner, F., Ziegler, C., Takagi, K., Bonal, D., & Alice, E. (2018). Interannual and seasonal variations in ecosystem transpiration and water use efficiency in a tropical rainforest. *Forest*, 10, 14, 19. <https://doi.org/10.3390/f10010014>
- Aubry-Kientz, M., Rossi, V., Boreux, J.-J., & Hérault, B. (2015a). A joint individual-based model coupling growth and mortality reveals that tree vigor is a key component of tropical forest dynamics. *Ecology and Evolution*, 5(12), 2457–2465. <https://doi.org/10.1002/ece3.1532>
- Aubry-Kientz, M., Rossi, V., Wagner, F., & Hérault, B. (2015b). Identifying climatic drivers of tropical forest dynamics. *Biogeosciences*, 12(19), 5583–5596. <https://doi.org/10.5194/bg-12-5583-2015>
- Aubry-Kientz, M., Rossi, V., Cornu, G., Wagner, F., & Hérault, B. (2019). Temperature rising would slow down tropical forest dynamic in the Guiana Shield. *Scientific Reports*, 9(1), 10235. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46597-8>
- Banda, F., Giudici, D., Le Toan, T. Le, Mariotti d’Alessandro, M. M., Papathanassiou, K., Quegan, S., Riembauer, G., Scipal, K., Soja, M., Tebaldini, S., Ulander, L., & Villard, L. (2020). The BIOMASS Level 2 Prototype Processor: Design and Experimental Results of Above-Ground Biomass Estimation. *Remote Sensing*, 12(6), 985. <https://doi.org/10.3390/rs12060985>
- Banda, F., & Mariotti, M. (2020). Ground and Volume Decomposition as a Proxy for AGB from P-Band SAR Data. *Remote Sensing*, 12, 1–13. <https://doi.org/10.3390/rs12020240>
- Baraloto, C., Rabaud, S., Molto, Q., Blanc, L., Fortunel, C., Hérault, B., Dávila, N., Mesones, I., Rios, M., Valderrama, E., & Fine, P. V. A. (2011). Disentangling stand and environmental correlates of aboveground biomass in Amazonian forests. *Global Change Biology*, 17(8), 2677–2688. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02432.x>
- Blanc, L., Echard, M., Hérault, B., Bonal, D., Marcon, E., Chave, J., & Baraloto, C. (2009). Dynamics of aboveground carbon stocks in a selectively logged tropical forest. *Ecological Applications*, 19(6), 1397–1404. <https://doi.org/10.1890/08-1572.1>
- Bonal, D., Bosc, A., Ponton, S., Goret, J. Y., Burban, B. T., Gross, P., Bonnefond, J. M., Elbers, J., Longdoz, B., Epron, D., Guehl, J. M., & Granier, A. (2008). Impact of severe dry season on net ecosystem exchange in the Neotropical rainforest of French Guiana. *Global Change Biology*, 14(8), 1917–1933. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01610.x>
- Bonal, D., Burban, B., Stahl, C., Wagner, F., & Hérault, B. (2016). The response of tropical rainforests to drought—lessons from recent research and future prospects. *Annals of Forest Science*, 73(1), 27–44. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0522-5>
- BRGM (2011). Inventaire du patrimoine géologique de la Guyane, p10

- Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo-Mendoza, A., Malhi, Y., Lewis, S. L., Vásquez Martínez, R., Alexiades, M., Álvarez Dávila, E., Alvarez-Loayza, P., Andrade, A., Aragão, L. E. O. C., Araujo-Murakami, A., Arets, E. J. M. M., Arroyo, L., ... Zagt, R. J. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, *519*(7543), 344–348. <https://doi.org/10.1038/nature14283>
- Cabon, A., Piponiot-Laroche, C., & Dourdain, A. (2015). Bilan Carbone de l'exploitation forestière sur le Domaine Forestier Permanent de Guyane française (Issue March). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4064.5927/1>
- Chave, J., Condit, R., Muller-Landau, H. C., Thomas, S. C., Ashton, P. S., Ewango, C. E. N., Feeley, K. J., Foster, R. B., Gunatilleke, N., Gunatilleke, S., Hall, P., Hart, T. B., Herna, C., Sukumar, R., Suresh, H. S., Tan, S., Thompson, J., & Tongco, M. D. C. (2008). Assessing Evidence for a Pervasive Alteration in Tropical Tree Communities. *PLoS Biol*, *6*(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060045>
- Chave, J., Navarrete, D., Almeida, S., Álvarez, E., Aragão, L. E. O. C., Bonal, D., Châtelet, P., Silva-Espejo, J. E., Goret, J. Y., Von Hildebrand, P., Jiménez, E., Patiño, S., Peñuela, M. C., Phillips, O. L., Stevenson, P., & Malhi, Y. (2010). Regional and seasonal patterns of litterfall in tropical South America. *Biogeosciences*, *7*(1), 43–55. <https://doi.org/10.5194/bg-7-43-2010>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, *20*(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chave, Jérôme, Davies, S. J., Phillips, O. L., Lewis, S. L., Sist, P., Schepaschenko, D., Armston, J., Baker, T. R., Coomes, D., Disney, M., Duncanson, L., Hérault, B., Labrière, N., Meyer, V., Réjou-Méchain, M., Scipal, K., & Saatchi, S. (2019). Ground Data are Essential for Biomass Remote Sensing Missions. *Surveys in Geophysics*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09528-w>
- Chave, Jérôme, Piponiot, C., Maréchaux, I., de Foresta, H., Larpin, D., Fischer, F. J., Derroire, G., Vincent, G., & Hérault, B. (2020). Slow rate of secondary forest carbon accumulation in the Guianas compared with the rest of the Neotropics. *Ecological Applications*, *30*(1), eap.2004. <https://doi.org/10.1002/eap.2004>
- Coudrier, T. (1992). Sur la place des lianes dans la forêt guyanaise : une approche qui utilise l'architecture végétale. Université de Montpellier.
- Derroire, G., Piponiot, C., Descroix, L., Bedeau, C., Traissac, S., Brunaux, O., Hérault, B. (2021). Prospective carbon balance of the wood sector in a tropical forest territory using a temporally-explicit model. *Forest Ecology and Management*. 497. 119532. [10.1016/j.foreco.2021.119532](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119532).
- Di Porcia e Brugnera, M., Meunier, F., Longo, M., Krishna Moorthy, S. M., De Deurwaerder, H., Schnitzer, S. A., Bonal, D., Faybishenko, B., & Verbeeck, H. (2019). Modeling the impact of liana infestation on the demography and carbon cycle of tropical forests. *Global Change Biology*, *25*(11), 3767–3780. <https://doi.org/10.1111/gcb.14769>

- Dourdain, A., & Hérault, B. (2015). Allometric equation in the Guiana Shield REDD + for the Guiana Shield (Issue November). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3735.4960>
- Fromard, F., Puig, H., Mougin, E., Marty, G., Betoulle, J. L., & Cadamuro, L. (1998). Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: New data from French Guiana. *Oecologia*, 115, 39–53.
- Peter W. Ellis, Trisha Gopalakrishna, Rosa C. Goodman, Francis E. Putz, Anand Roopsind, Peter M. Umunay, Joey Zalman, Edward A. Ellis, Karen Mo, Timothy G. Gregoire, Bronson W. Griscom, Reduced-impact logging for climate change mitigation (RIL-C) can halve selective logging emissions from tropical forests, *Forest Ecology and Management*, Volume 438, 2019, Pages 255-266, ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.004>.
- FAO (2004). Reduced impact logging in tropical forests : Literature synthesis, analysis and prototype statistical framework. Forest Harvesting; Engineering Programme – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAO (2020). Evaluation des ressources forestières mondiales 2020, rapport Guyane française.
- Fauset, S., Johnson, M. O., Gloor, M., Baker, T. R., Monteagudo M., A., Brien, R. J. W., Feldpausch, T. R., Lopez-Gonzalez, G., Malhi, Y., Ter Steege, H., Pitman, N. C. A., Baraloto, C., Engel, J., Pétronelli, P., Andrade, A., Camargo, J. L. C., Laurance, S. G. W., Laurance, W. F., Chave, J., ... Phillips, O. L. (2015). Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. *Nature Communications*, 6, 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms7857>
- Fayad, I., Baghdadi, N., Guitet, S., Bailly, J.-S., Hérault, B., Gond, V., El Hajj, M., & Minh, D. H. T. (2016). Aboveground biomass mapping in French Guiana by combining remote sensing, forest inventories and environmental data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 502–514. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.015>
- Feldpausch, T. R., Phillips, O. L., Brien, R. J. W., Gloor, E., Lloyd, J., Malhi, Y., Alarcón, A., Dávila, E. Á., Andrade, A., Aragao, L. E. O. C., Arroyo, L., Aymard, G. A. C., Baker, T. R., Baraloto, C., Barroso, J., Bonal, D., Castro, W., Chama, V., Chave, J., ... Vos, V. A. (2016). Amazon forest response to repeated droughts. *Global Biogeochemical Cycles*, 964–982. <https://doi.org/10.1002/2015GB005133>.Received
- Ferry, B., Morneau, F., Bontemps, J.-D., Blanc, L., & Freycon, V. (2010). Higher treefall rates on slopes and waterlogged soils result in lower stand biomass and productivity in a tropical rain forest. *Journal of Ecology*, 98(1), 106–116. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01604.x>
- Fu, Z., Gerken, T., Bromley, G., Araújo, A., Bonal, D., Burban, B., Ficklin, D., Fuentes, J. D., Goulden, M., Hirano, T., Kosugi, Y., Liddell, M., Nicolini, G., Niu, S., Rouspard, O., Stefani, P., Mi, C., Tofte, Z., Xiao, J., ... Stoy, P. C. (2018). The surface-atmosphere exchange of carbon dioxide in tropical rainforests: Sensitivity to environmental drivers and flux measurement methodology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263(December 2017), 292–307. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.001>
- GIEC (2006). Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur CATF
- Galbraith, D., Malhi, Y., Affum-Baffoe, K., Castanho, A. D. A., Doughty, C. E., Fisher, R. A., Lewis, S. L., Peh, K. S.-H., Phillips, O. L., Quesada, C. A., Sonké, B., & Lloyd, J. (2013).

- Residence times of woody biomass in tropical forests. *Plant Ecology & Diversity*, 6(1), 139–157. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.770578>
- Gelas, C., Villard, L., Ferro-Famil, L., Polidori, L., Koleck, T., & Daniel, S. (2021). Multi-Temporal Speckle Filtering of Polarimetric P-Band SAR Data over Dense Tropical Forests: Study Case in French Guiana for the BIOMASS Mission. *Remote Sensing*, 13(1), 142. <https://doi.org/10.3390/rs13010142>
- Goulamoussène, Y., Bedeau, C., Descroix, L., Linguet, L., and Hérault, B. (2017). Environmental control of natural gap size distribution in tropical forests, *Biogeosciences*, 14, 353–364, <https://doi.org/10.5194/bg-14-353-2017>.
- Guitet, S, Blanc, L., Chave, J., & Gomis, A. (2007). Expertise sur les références dendrométriques nécessaires au renseignement de l'inventaire national de gaz à effet de serre pour la forêt guyanaise. Office National des Forêts, Direction régionale de Guyane Rapport final.
- Guitet, S., Cornu, J-F., Brunaux, O., Betbeder, J., Carozza, J-M., et al. (2013). Landform and landscape 651 mapping, French Guiana (South America). *Journal of Maps* 9 : 325-335.
- Guitet S., Brunaux O., de Granville J.J., Gonzalez S., Richard-Hansen C. (2015). Catalogue des habitats forestiers de Guyane. DEAL Guyane. 120p.
- Guitet, Stéphane. (2015). Diversité des écosystèmes forestiers de Guyane française : distribution, déterminants et conséquences en termes de services écosystémiques. Université de Montpellier.
- Guitet, S., Pélissier, R., Brunaux O., Jaouen G., Sabatier, D. (2015b). Geomorphological landscape features explain floristic patterns in French Guiana rainforest. *Biodiversity and Conservation*, 24 (5), p. 1215-1237. ISSN 0960-3115.
- Guyane Energie Climat (2016). Les émissions de gaz à effet de serre liées à la forêt en Guyane
- Hérault, B., & Pioniot, C. (2018). Key drivers of ecosystem recovery after disturbance in a neotropical forest. *Forest Ecosystems*, 5(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s40663-017-0126-7>
- Hérault, B., Coste, S., Derroire, G., Descroix, L., Dulormne, M., Louison, L., Pioniot-Laroche, C., & Traissac, S. (2020). Gestion forestière et changements climatiques en Guyane française. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34751.33442/1>
- Hiltner, U., Huth, A., Bräuning, A., Hérault, B., & Fischer, R. (2018). Simulation of succession in a neotropical forest: High selective logging intensities prolong the recovery times of ecosystem functions. *Forest Ecology and Management*, 430, 517–525. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.042>
- Hiltner Ulrike, Huth Andreas, Herault Bruno, Holtmann Anne, Bräuning Achim, Fischer Rico (2021). Climate change alters the ability of neotropical forests to provide timber and sequester carbon. *Forest Ecology and Management*, 492:119166, 11 p. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119166>
- Ho Tong Minh, D., Tebaldini, S., Rocca, F., Le Toan, T., Borderies, P., Koleck, T., Albinet, C., Villard, L., & Hamadi, A. (2013). Temporal decorrelation in tropical forest : Results from TropiScat and implications for BIOMASS tomography. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1206–1209. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6722996>

- Ho Tong Minh, D., Tebaldini, S., Rocca, F., Le Toan, T., Villard, L., & Dubois-Fernandez, P. C. (2015). Capabilities of BIOMASS Tomography for Investigating Tropical Forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(2), 965–975. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2331142>
- Hubau, W., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Affum-Baffoe, K., Beeckman, H., Cuní-Sanchez, A., Daniels, A. K., Ewango, C. E. N., Fauset, S., Mukinzi, J. M., Sheil, D., Sonké, B., Sullivan, M. J. P., Sunderland, T. C. H., Taedoumg, H., Thomas, S. C., White, L. J. T., Abernethy, K. A., Adu-Bredu, S., ... Zemagho, L. (2020). Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature*, 579(7797), 80–87. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>
- IGN (2015). Indicateurs de gestion durable des forêts ultramarines de Guyane, édition 2015 publiée en 2018
- Joetzjer, E., Pillet, M., Ciais, P., Barbier, N., Chave, J., Schlund, M., Maignan, F., Barichivich, J., Luysaert, S., Hérault, B., von Poncet, F., & Poulter, B. (2017). Assimilating satellite-based canopy height within an ecosystem model to estimate aboveground forest biomass. *Geophysical Research Letters*, 44(13), 6823–6832. <https://doi.org/10.1002/2017GL074150>
- Johnson, M. O., Galbraith, D., Gloor, M., De Deurwaerder, H., Guimberteau, M., Rammig, A., Thonicke, K., Verbeeck, H., von Randow, C., Monteagudo, A., Phillips, O. L., Brienen, R. J. W., Feldpausch, T. R., Lopez Gonzalez, G., Fauset, S., Quesada, C. A., Christoffersen, B., Ciais, P., Sampaio, G., ... Baker, T. R. (2016). Variation in stem mortality rates determines patterns of above-ground biomass in Amazonian forests: implications for dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 22(12), 3996–4013. <https://doi.org/10.1111/gcb.13315>
- Lescure, J.P., Puig, H., Riera, B., Leclerc, D., Beekman, A. & Beneteau, A. (1983). La phytomasse épigée d'une forêt dense en Guyane française. *Acta OEcologica*, 4.
- Lefsky, M. A., Harding, D. J., Keller, M., Cohen, W. B., Carabajal, C. C., Del Bom Espirito-Santo, F., ... & de Oliveira Jr, R. (2005). Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophysical Research Letters*, 32(22).
- Liang, J., Crowther, T. W., Picard, N., Wiser, S., Zhou, M., Alberti, G., Schulze, E.-D., McGuire, A. D., Bozzato, F., Pretzsch, H., De-Miguel, S., Paquette, A., Hérault, B., Scherer-Lorenzen, M., Barrett, C. B., Glick, H. B., Hengeveld, G. M., Nabuurs, G.-J., Pfautsch, S., ... Reich, P. B. (2016). Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science*, 354(6309), 196. <https://doi.org/10.1126/science.aaf8957>
- Liao, Z., He, B., Quan, X., van Dijk, A. I. J. M., Qiu, S., & Yin, C. (2019). Biomass estimation in dense tropical forest using multiple information from single-baseline P-band PolInSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 221, 489–507. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.11.027>
- Longo, M., Knox, R. G., Levine, N. M., Alves, L. F., Bonal, D., Camargo, P. B., Fitzjarrald, D. R., Hayek, M. N., Restrepo-Coupe, N., Saleska, S. R., da Silva, R., Stark, S. C., Tapajós, R. P., Wiedemann, K. T., Zhang, K., Wofsy, S. C., & Moorcroft, P. R. (2018). Ecosystem heterogeneity and diversity mitigate Amazon forest resilience to frequent extreme droughts. *New Phytologist*, 219(3), 914–931. <https://doi.org/10.1111/nph.15185>

- Longo, M., Saatchi, S., Keller, M., Bowman, K., Ferraz, A., Moorcroft, P. R., Morton, D. C., Bonal, D., Brando, P., Burban, B., Derroire, G., Dos-Santos, M. N., Meyer, V., Saleska, S., Trumbore, S., & Vincent, G. (2020). Impacts of Degradation on Water, Energy, and Carbon Cycling of the Amazon Tropical Forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(8), 2020–005677. <https://doi.org/10.1029/2020JG005677>
- Meunier, Félicien, Verbeeck, Hans, Cowdery, Betsy, Schnitzer, Stefan, Smith-Martin, Chris, Powers, Jennifer, Xu, Xiangtao, Slot, Martijn, De Deurwaerder, Hannes, Detto, Matteo, Bonal, Damien, Longo, Marcos, Santiago, Louis, Dietze, Michael (2020). Unraveling the relative role of light and water competition between lianas and trees in tropical forests, 109, 10.1111/1365-2745.13540, *Journal of Ecology*
- Meyer, V., Saatchi, S., Clark, D. B., Keller, M., Vincent, G., Ferraz, A., Espírito-Santo, F., D&#amp;#oacute;Oliveira, M. V. N., Kaki, D., & Chave, J. (2018). Canopy Area of Large Trees Explains Aboveground Biomass Variations across Nine Neotropical Forest Landscapes. *Biogeosciences Discussions*, 1–38. <https://doi.org/10.5194/bg-2017-547>
- Molto, Q. (2012). Estimation de la biomasse en forêt tropicale humide : propagation des incertitudes dans la modélisation de la distribution spatiale de la biomasse en Guyane Française [Université des Antilles et de la Guyane]. <http://www.theses.fr/2012AGUY0567>
- Molto, Q., Rossi, V., & Blanc, L. (2013). Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2), 175–183. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00266.x>
- Muakana Mulumba, R. (2017). Détermination de la biomasse et caractérisation de la biodiversité dans la forêt tropicale humide de la Guyane française. <https://hal.inrae.fr/hal-02607126>
- OBS (2019). Atlas des tissus urbains, Identification et description des tissus, p6, [Ob-Foncier 4.pdf \(audeg.fr\)](#)
- ONF (2013). Guide de sylviculture
- ONF (2014). Guide de sylviculture pour la production de bois d’œuvre des forêts du nord de la Guyane
- 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.
- 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 et al. (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), 540 p.
- Phillips, O. L., Aragão, L. E. O. C., Lewis, S. L., Fisher, J. B., Lloyd, J., López-gonzález, G., Malhi, Y., Monteagudo, A., Peacock, J., Quesada, C. A., Heijden, G. Van Der, Almeida, S., Amaral, I., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T. R., Bánki, O., Blanc, L., Bonal, D., ...

- Salamão, R. (2009). *Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest* (Vol. 323, Issue March).
- Phillips, O. L., Martinez, R. V., Arroyo, L., Baker, T. R., Killeen, T., Lewis, S. L., Malhi, Y., Monteagudo, A., Mendoza, D. N., Vargas, P. N., Alexiades, M., Ceron, C., Di, A., Saldias, M., & Vinceti, B. (2002). Increasing dominance of large lianas in Amazonian forests. *Nature*.
- Piponiot, C., Sist, P., Mazzei, L., Peña-Claros, M., Putz, F. E., Rutishauser, E., Shenkin, A., Ascarrunz, N., de Azevedo, C. P., Baraloto, C., França, M., Guedes, M., Honorio Coronado, E. N., D'Oliveira, M. V. N., Ruschel, A. R., da Silva, K. E., Doff Sotta, E., de Souza, C. R., Vidal, E., ... Hérault, B. (2016a). Carbon recovery dynamics following disturbance by selective logging in amazonian forests. *ELife*, 5(2016a). <https://doi.org/10.7554/eLife.21394>
- Piponiot, C., Cabon, A., Descroix, L. *et al.* A methodological framework to assess the carbon balance of tropical managed forests. *Carbon Balance Manage* 11, 15 (2016b). <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0056-7>
- Piponiot, Camille. (2018). Quel futur pour les forêts de production en Amazonie ? Du bilan Carbone de l'exploitation forestière à la recherche de compromis entre services écosystémiques (bois d'œuvre, biodiversité et carbone). Université de Guyane.
- Piponiot, C., Rutishauser, E., Derroire, G., Putz, F. E., Sist, P., West, T. A. P., Descroix, L., Guedes, M. C., Coronado, E. N. H., Kanashiro, M., Mazzei, L., D'Oliveira, M. V. N., Peña-Claros, M., Rodney, K., Ruschel, A. R., De Souza, C. R., Vidal, E., Wortel, V., & Hérault, B. (2019). Optimal strategies for ecosystem services provision in Amazonian production forests. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124090. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5eb1>
- Puig, H., & Delobelle, J. P. (1988). Production de litière, nécromasse, apports minéraux au sol par la litière en forêt guyanaise. *Revue Ecologie*.
- Puig, H., Riera, B., & Lescure, J. P. (1990). Phytomasse et productivité. *Bois et Forêts Des Tropiques N°220 Spécial Guyane*, 25–32.
- Rejou-Mechain M., Tanguy A., Piponiot C., Chave J., Hérault B. (2016). BIOMASS : An R Package for estimating above-ground biomass and its uncertainty in tropical forests. R package version 1.0.
- Rolland, G. (2006). *Stockage de carbone dans la biomasse aérienne en forêt tropicale humide guyanaise* - *AgroParisTech*. https://agroparistech.focus.universite-paris-saclay.fr/primo-explore/fulldisplay?docid=33PPA-AGR_ILS153019&context=L&vid=33PPA-AGR_VU1&lang=fr_FR&search_scope=default_scope&adaptor=LocalSearchEngine&tab=default_tab&query=sub,contains,carbone,AND&query=s
- 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.
- Rossi, V., Dolley, T., Cornu, G., Guitet, S., & Hérault, B. (2015). Guyasim : un outil d'aide à la décision pour l'aménagement d'un territoire forestier, la Guyane. *Bois & Forêts des Tropiques* 326(326), 67-78. <https://doi.org/10.19182/bft2015.326.a31285>

- Rowland, L., Stahl, C., Bonal, D., Siebicke, L., Williams, M., & Meir, P. (2013). The Response of Tropical Rainforest Dead Wood Respiration to Seasonal Drought. *Ecosystems*, 16(7), 1294–1309. <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9684-x>
- Rowland, Lucy, Hill, T. C., Stahl, C., Siebicke, L., Burban, B., Zaragoza-Castells, J., Ponton, S., Bonal, D., Meir, P., & Williams, M. (2014). Evidence for strong seasonality in the carbon storage and carbon use efficiency of an Amazonian forest. *Global Change Biology*, 20(3), 979–991. <https://doi.org/10.1111/gcb.12375>
- Roy, J., & Salager, J.-L. (1992). Midday depression of net CO₂ exchange of leaves of an emergent rain forest tree in French Guiana. *Journal of Tropical Ecology*, 8, 499–504. <https://doi.org/10.1017/S0266467400006842>
- Rutishauser, E., Hérault, B., Baraloto, C., Blanc, L., Descroix, L., Sotta, E. D., Ferreira, J., Kanashiro, M., Mazzei, L., D'Oliveira, M. V. N., de Oliveira, L. C., Peña-Claros, M., Putz, F. E., Ruschel, A. R., Rodney, K., Roopsind, A., Shenkin, A., da Silva, K. E., de Souza, C. R., ... Sist, P. (2015). Rapid tree carbon stock recovery in managed Amazonian forests. In *Current biology: CB* (Vol. 25, Issue 18). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.07.034>
- Schepaschenko, D., Chave, J., Phillips, O.L. *et al.* The Forest Observation System, building a global reference dataset for remote sensing of forest biomass. *Sci Data* 6, 198 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0196-1>
- 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., Hérault, B., Sardans, J., Peñuelas, J., & Verbruggen, E. (2020). Soil properties explain tree growth and mortality, but not biomass, across phosphorus-depleted tropical forests. *Scientific Reports*, 10(1), 2302. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58913-8>
- Stahl, C. (2010). Variations saisonnières des flux de CO₂ et H₂O au niveau des feuilles et des troncs des arbres de la canopée en forêt tropicale humide guyanaise. Université Henri Poincaré - Nancy 1.
- Sullivan, M. J. P., Lewis, S. L., Affum-Baffoe, K., Castilho, C., Costa, F., Sanchez, A. C., Ewango, C. E. N., Hubau, W., Marimon, B., Monteagudo-Mendoza, A., Qie, L., Sonké, B., Martinez, R. V., Baker, T. R., Brienen, R. J. W., Feldpausch, T. R., Galbraith, D., Gloor, M., Malhi, Y., ... Phillips, O. L. (2020). Long-term thermal sensitivity of Earth's tropical forests. *Science*, 368(6493), 869–874. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7578>
- Sullivan, M. J. P., Talbot, J., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Qie, L., Begne, S. K., Chave, J., Cuni-Sanchez, A., Hubau, W., Lopez-Gonzalez, G., Miles, L., Monteagudo-Mendoza, A., Sonké, B., Sunderland, T., Ter Steege, H., White, L. J. T., Affum-Baffoe, K., Aiba, S. I., De Almeida, E. C., ... Zemagho, L. (2017). Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. *Scientific Reports*, 7(October 2016), 1–12. <https://doi.org/10.1038/srep39102>
- Tymen, B., Réjou-Méchain, M., Dalling, J.W., Fauset, S., Feldpausch, T.R., Norden, N., Phillips, O.L., Turner, B.L., Viers, J. and Chave, J. (2016), Evidence for arrested succession in a liana-infested Amazonian forest. *J Ecol*, 104: 149-159. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12504>
- Wagner, F. H., Hérault, B., Bonal, D., Stahl, C., Anderson, L. O., Baker, T. R., Becker, G. S., Beekman, H., Boanerges Souza, D., Botosso, P. C., Bowman, D. M. J. S., Bräuning, A., ... Chave, J. (2019). The Amazonian carbon cycle: A synthesis of field and remote sensing data. *Global Change Biology*, 25(1), 1–15. <https://doi.org/10.1111/gcb.14588>

- A., Brede, B., Brown, F. I., Camarero, J. J., Camargo, P. B., Cardoso, F. C. G., Carvalho, F. A., Castro, W., ... Aragão, L. E. O. C. (2016). Climate seasonality limits leaf carbon assimilation and wood productivity in tropical forests. *Biogeosciences*, 13(8), 2537–2562. <https://doi.org/10.5194/bg-13-2537-2016>
- Wagner, F., Rossi, V., Stahl, C., Bonal, D., & Hérault, B. (2013). Asynchronism in leaf and wood production in tropical forests: A study combining satellite and ground-based measurements. *Biogeosciences*, 10(11), 7307–7321. <https://doi.org/10.5194/bg-10-7307-2013>
- Wagner, Fabien, Rossi, V., Aubry-Kientz, M., Bonal, D., Dalitz, H., Gliniars, R., Stahl, C., Trabucco, A., & Hérault, B. (2014). Pan-tropical analysis of climate effects on seasonal tree growth. *PLoS ONE*, 9(3), 20–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092337>
- Wagner, Fabien, Rossi, V., Stahl, C., Bonal, D., & Hérault, B. (2012). Water availability is the main climate driver of neotropical tree growth. *PLoS ONE*, 7(4), 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034074>
- Walcker (2015). Dynamique spatiale des mangroves de Guyane entre 1950 et 2014 : forçage atmosphérique et conséquence pour le stock de carbone côtier. Université de Toulouse.

Annexe 1 : La forêt, puits ou source de carbone ?

La forêt est souvent présentée comme un « puits » de carbone. Elle serait capable d'absorber et de stocker à long terme le carbone de l'atmosphère présent sous forme de CO₂. Pourtant, cette affirmation divise les scientifiques en Amazonie, notamment depuis l'accélération de l'exploitation forestière, de la déforestation ainsi que du changement climatique. La forêt ne serait alors plus un « puits » de carbone, mais une « source ». Qu'en est-il de la forêt amazonienne guyanaise ?

Plusieurs travaux menés sur le site de Paracou ont tenté de calculer la capacité de la forêt guyanaise à stocker du carbone, d'abord à l'aide de modèles, puis grâce aux données enregistrées par la tour à flux installée sur le site. Cependant, la généralisation des observations faites à Paracou à la forêt guyanaise puis amazonienne dans son ensemble a fait l'objet de questionnements, accompagnés d'un certain nombre d'arguments en faveur du statut de « source de carbone ». Qu'en est-il ?

- **La forêt guyanaise vue comme un puits de carbone**

Blanc et al. (2006) ont suivi la dynamique spatiale et temporelle de la mortalité, du recrutement et de l'accroissement des arbres du site de Paracou entre 1983 et 2003. Sur la forêt naturelle non exploitée, ils y ont observé un bilan de biomasse globalement positif traduisant un stockage de carbone allant de 0,13 à 1,26 tC/ha/an. De même, en utilisant un modèle de flux de carbone entre l'atmosphère et les arbres, Rowland et al. (2014) ont calculé un stockage net moyen de 3,41 tC/ha/an sur le site entre 2004 et 2011, avec une production primaire brute annuelle moyenne 9 % plus élevée que la respiration.

L'installation, en 2003, de la tour à flux au-dessus de la forêt du site de Paracou, a marqué un tournant dans l'évaluation de la capacité de l'écosystème dans son ensemble à stocker du carbone. En effet, contrairement aux études précédemment citées, la tour enregistre les flux de CO₂ au-dessus de la forêt, qu'ils proviennent ou aillent en direction du sol, des arbres, de la litière, des animaux, etc. Ainsi, malgré une variabilité interannuelle importante de production primaire nette, Bonal et al. (2008), Aguilos et al. (2018), Stahl et al. (2017) ont montré que la forêt avait agi comme un puits de carbone de 2004 à 2015, avec une moyenne de 3,35 tC stocké/ha/an (Aguilos et al., 2018).

- **Le site de Paracou, représentatif de la forêt guyanaise ?**

Le site de Paracou sur lequel est installée la tour à flux est un site particulier. En effet, il est tout d'abord marqué par des caractéristiques pédomorphiques propres. Par ailleurs, la tour ne permet que de mesurer les échanges gazeux sur une surface réduite, qui plus est sur un site en « lisière » et non pas en forêt profonde. Ainsi, les scientifiques de Guyane remettent sérieusement en question la généralisation des observations faites sur le site à la forêt guyanaise dans son intégralité.

- **Reconstitution de carbone dans la forêt amazonienne**

De plus en plus d'évidences suggèrent que la forêt est en phase de reconstitution après la perte démographique brutale de 99% des populations précolombiennes à la suite du choc microbien (Odonne, 2019). Ainsi, le massif amazonien n'en finit pas de se remettre d'une occupation humaine très ancienne et généralisée. Cette reconstitution se fait sur des temps très longs de plusieurs siècles (Korner, 2003). Il se pourrait ainsi que le puits historique ne soit que le signe de cette reconstitution.

- **Effets de la variabilité saisonnière sur les calculs de capacités de stockages**

Selon la période de l'année, la dynamique forestière fait que les forêts passent du rôle de puits à celui de source (voir III.2). On observe des pics d'émissions momentanés dus à des phénomènes de mortalité brutale des gros arbres et aux chablis multiples, puis sur plusieurs années à une « recapture du carbone ». Statistiquement il y a plus de chance de tomber sur une phase « puits » plutôt que « source » (source : entretien avec Bruno Héroult).

- **Effets du changement climatique sur le puits de carbone amazonien**

La Guyane est menacée d'une augmentation générale des températures de l'air et de la fréquence des événements climatiques sévères dont les sécheresses et les inondations. L'augmentation de température est déjà très perceptible en Guyane. On y observe en effet + 1,5 °C sur la période 1955-2020 (Météo France, 2020).

Brienen et al. (2015) ont réalisé une analyse des dynamiques d'évolution de la production de biomasse des forêts dans le bassin amazonien depuis 1990. Plusieurs sites de suivi ont été utilisés dont celui de Paracou. Ils estiment ainsi que la tendance est à la baisse du stockage de carbone, avec une diminution d'un tiers depuis les années 1990. Elle serait la conséquence de l'augmentation du taux de mortalité due à la variabilité climatique et de la stagnation du taux de croissance.

Hubau et al. (2020) ont observé le même déclin à long terme du puits de la forêt amazonienne, contrairement à la forêt africaine, moins touchée par une élévation de la mortalité et dont le stockage est resté stable (0,66 tC/ha/an stockés).

Avec la température, l'efficacité de la photosynthèse, donc l'entrée de carbone dans la plante, augmente doucement. Au-delà d'un certain seuil (30-32°C), elle chute violemment. Or, sur notre zone d'étude, de nombreuses heures de la journée sont déjà au-dessus du seuil de 30-32°C, entraînant une fermeture des stomates et donc une diminution d'entrée de carbone. Ceci a pour conséquence une diminution de la production de biomasse, comme l'ont simulé Sullivan et al. (2020) à échelle pantropicale et Aubry-Kientz et al. (2019) et Hiltner et al. (2021) en Guyane.

Aussi, l'augmentation des événements de sécheresses extrêmes pourrait entraîner des déstockages massifs et ponctuels de carbone liés à des surmortalités (Bonal, 2016) comme observé en 2005 et 2010 (Phillips, 2009 ; Doughty, 2015), même si la Guyane n'avait pas été vraiment touchée.

Longo et al. (2018) ont montré que des concentrations plus élevées en CO₂ atmosphérique augmentaient le stockage de carbone par les forêts. Or, pour certains scientifiques, le grossissement des arbres dû au carbone atmosphérique disponible et facilement assimilable

serait limité par des facteurs biophysiques. Nous serions alors à un plateau de croissance de biomasse, avec un début d'augmentation de mortalité de ces « gros arbres ».

- **Effets de l'exploitation forestière et de la déforestation sur le puits amazonien**

Pour établir un bilan carbone complet, il faut comptabiliser les effets de la déforestation et de la dégradation de la forêt comme l'on fait plusieurs auteurs. Ainsi, dans son bilan carbone incluant l'intensité de l'exploitation, la décomposition progressive de la biomasse et la repousse de la forêt, Piponiot (2018) montre qu'en 2012, le bilan carbone net de la forêt guyanaise était finalement positif, avec des valeurs comprises entre $0,12$ à $1,33 * 10^9$ tC et une valeur médiane de $0,64 * 10^{12}$ tC. La forêt serait donc source de carbone.

Conclusion :

Certains auteurs affirment que la thèse selon laquelle la forêt amazonienne (dont la forêt guyanaise) serait un puits de carbone n'est plus effective depuis une dizaine d'années. Les effets du changement climatique, ainsi que ceux de l'exploitation forestière et de la déforestation, ont grandement participé à la fin de ce statut. Par ailleurs, les observations initialement faites en Guyane étaient discutables du fait de la représentativité du site de Paracou.

Si certains auteurs montrent que la forêt amazonienne agit encore comme puits de carbone, ils sont généralement d'accord sur la diminution du potentiel de ce puits (Brienen et al., 2017 ; Hubau et al., 2020).

Enfin, pour d'autres, la forêt amazonienne est d'ores et déjà une source. A échelle pantropicale et en mesurant les variations de densité forestière à l'aide d'images satellites de 2003 à 2014, Baccini et al. (2017) ont montré que les forêts tropicales mondiales étaient une source nette de carbone, avec des émissions de $425,2 \pm 92,0 * 10^9$ tC/an.

Annexe 2 : Bilan des émissions de Gaz à Effet de Serre

L'objectif de cette annexe est de rappeler les règles générales de calcul des bilans de gaz à effet de serre (GES), et de présenter les données disponibles en Guyane. Dans un premier temps, le bilan GES de la forêt guyanaise est présenté. L'impact en termes de GES de la conversion de la forêt en agriculture est ensuite exposé. Le cas du barrage de Petit Saut est également abordé. Enfin, le bilan GES des activités agricoles est dressé.

Certaines pratiques ou conditions du milieu permettent de diminuer les pertes de carbone de la biomasse aérienne et du sol en réduisant la respiration des micro-organismes. En revanche, elles peuvent être à l'origine de l'activation de certaines voies métaboliques menant à l'augmentation des émissions d'autres gaz comme le CH₄ ou le N₂O. Or ces gaz sont respectivement 28 et 298 fois plus puissants que le CO₂ en termes de pouvoir de réchauffement¹⁰. Cela met en avant la nécessité de comprendre les mécanismes à l'origine de leurs émissions, ainsi que de les prendre en compte dans les bilans carbone (voir Cadre 1).

Les émissions de CH₄ sont liées à une décomposition de matière organique en milieu anaérobie que l'on appelle la fermentation. Elle est pratiquée par des bactéries dites méthanogènes. On en retrouve notamment dans l'estomac des ruminants et dans les milieux continuellement inondés comme les rizières, à l'origine de forts taux d'émissions de CH₄. Il existe également des bactéries dites méthanotrophes, capables d'oxyder le CH₄ en présence de dioxygène pour l'utiliser comme source de carbone et d'énergie. Il s'agit donc de bactéries qui absorbent le CH₄.

Les émissions de N₂O proviennent d'un ensemble de réactions d'oxydoréduction de l'azote présent dans le sol sous forme de nitrates (NO₃⁻) par différents micro-organismes. C'est la réaction de dénitrification. L'ajout d'engrais azotés, la présence de légumineuses ou encore l'excrétion par les animaux au pâturage augmentent le stock d'azote du sol potentiellement oxydable en N₂O. Selon les conditions du milieu, la dénitrification peut être complète ou non. Si elle est complète, le N₂O est finalement réduit en N₂, un gaz qui ne provoque pas d'effet de serre. Cette réaction finale est favorisée en milieu d'anaérobiose et/ou lorsque les micro-organismes présents expriment le gène de réduction du N₂O en N₂ (gène de codage de la N₂O réductase) (Khalil et al., 2005).

¹⁰ PRG à 100 ans (voir Cadre 1).

Cadre 1 : Passer d'un bilan « Gaz à Effet de Serre » (GES) à un bilan carbone

La notion de bilan GES est souvent associée à celle de bilan carbone. La communauté scientifique a en effet permis de comparer les émissions des différents GES entre elles, en donnant la possibilité de convertir des quantités de CH₄ ou de N₂O en « équivalent CO₂ ». Cette conversion se base sur les pouvoirs de réchauffement des gaz appelé PRG (Pouvoir de Réchauffement Global) : sur 100 ans, une molécule de CH₄ absorbe 28 fois plus de rayonnement solaire qu'une molécule de CO₂ (PRG à 100 ans). Sur 20 ans, elle en absorbe 67 fois plus. Généralement, c'est le PRG à 100 ans qui est le plus utilisé.

1 tCH₄ = 28 teqCO₂ (PRG 100 ans)

1 tN₂O = 298 teqCO₂ (PRG 100 ans)

1. Bilan GES de la forêt

1.1. Émissions de CO₂, CH₄ et N₂O par les sols des forêts

Selon les conditions du milieu, les sols se comportent en puits ou sources de GES. Les conditions anoxiques favorisent les émissions de CH₄ et de N₂O, tandis qu'elles réduisent la respiration et donc les émissions de CO₂. Pourtant, il semblerait que les interactions biochimiques du sol à l'origine des émissions de GES soient plus complexes qu'il n'y paraît, et les résultats contradictoires de certaines études marquent un manque de connaissances à l'heure actuelle.

Courtois et al. (2018) ont mesuré l'influence de la topographie et des caractéristiques du sol (teneur en eau, température, densité, pH, etc.) des sites forestiers de Paracou et des Nouragues sur les flux de CO₂, CH₄ et N₂O en provenance des sols. Les gaz ont été récoltés à l'aide d'une chambre et d'un analyseur de gaz. Ces travaux ont été complétés par ceux de Bréchet et al. (2019) qui ont étudié l'effet de la réduction artificielle des précipitations ainsi que de l'augmentation de la disponibilité en nutriments (azote et phosphore) sur les flux de CO₂ et de CH₄ en provenance des sols sur le site de Paracou.

Tout d'abord, malgré un engorgement en eau possible des bas-fonds favorisant un milieu anoxique, Courtois et al. (2018) ont montré que la position topographique n'avait pas d'effet sur les flux de GES mesurés. Les émissions de N₂O et de CO₂ augmentent en fonction de l'augmentation de la quantité de phosphore et d'azote disponible dans le sol (Courtois et al., 2018 ; Bréchet et al., 2020). Ces derniers n'ont en revanche pas d'effet sur le CH₄ (Bréchet et al., 2020). Courtois et al. (2018) notent une absorption de N₂O dans pratiquement tous leurs échantillons de sol, typique d'une situation de dénitrification totale menant à la production de N₂ à partir de N₂O.

De plus, Courtois et al. (2018) ont montré que les flux de CH₄ et de CO₂ variaient en fonction de la saturation en eau, avec une phase d'absorption dans des conditions sèches et une phase d'émissions modérées dans des conditions humides. La saturation en eau rend le milieu anoxique et donc favorable à l'action des bactéries méthanogènes et donc aux émissions de CH₄.

Pourtant, d'après l'étude de Bréchet et al. (2019), les émissions de CH₄ augmentent à mesure de la diminution de la disponibilité en eau des sols, représentative de conditions de sécheresse. Les bactéries méthanotrophes responsables de l'absorption du CH₄ seraient en effet particulièrement sensibles au stress hydrique (Benstead and King, 1997, *in* Bréchet et al., 2020). Les émissions totales augmenteraient à mesure que l'absorption diminue.

1.2. Emissions de CH₄ et N₂O par les troncs des arbres

La question du statut de source ou de puits de CO₂ de la forêt amazonienne anime les scientifiques depuis une dizaine d'années (voir Annexe 1 « La forêt, puits ou source de carbone ? »). Depuis plus récemment, la communauté scientifique s'intéresse de plus près à la capacité des troncs à émettre du CH₄ et du N₂O. Ces deux gaz produits en condition anoxique dans les sols et sous forme dissoute dans l'eau seraient absorbés par les racines jusqu'aux troncs pour être finalement rediffusés dans l'atmosphère via les lenticelles. C'est ce que montre une étude réalisée au Panama. Les auteurs ont en effet montré que les troncs étaient une source de CH₄ et de N₂O pendant la transition de la saison sèche à la saison humide (Welch et al., 2018).

Les travaux communs de Bréchet et al. (2021) et Daniel et al. (2021) ont spécifiquement porté sur les émissions de CH₄ et de N₂O par les troncs des arbres de la forêt de Paracou.

Sur une centaine d'arbres d'espèces différentes et issus d'habitats forestiers différents, les auteurs ont mesuré que plus de la moitié d'entre eux se sont comportés comme source de CH₄ (Daniel et al., 2021). Une analyse comparative a permis de montrer que les émissions étaient corrélées à la densité de l'aubier, et donc à l'espèce, mais pas à l'habitat forestier, l'humidité du sol et le diamètre (pris à hauteur de poitrine). Environ un quart ont par ailleurs présenté des émissions nettes de N₂O. Les flux ne sont pas corrélés à l'habitat mais au diamètre des arbres, à la densité de l'aubier et à l'humidité du sol.

2. Bilan GES du passage de la forêt à l'agriculture

2.1. Défriche avec brûlis

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. La parcelle est ensuite brûlée ; on parle d'« abattis brûlis ». Dans la défriche mécanisée, la majeure partie de la biomasse aérienne forestière est abattue, mise au sol et réunie en andains à l'aide de pelles ou de bulldozer. Les andains sont ensuite brûlés.

Quel que soit le type de défriche utilisé, une partie de la biomasse aérienne forestière se décompose au sol et une autre partie est brûlée. La réaction de combustion du bois suit l'équation $C_xH_y + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$. Or, en conditions réelles, cette combustion est souvent imparfaite et mène également à l'émission d'autres gaz que le CO₂, comme le CH₄, le N₂O et le CO. Une faible part de la biomasse brûlée reste également au sol sous forme de charbon de bois.

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) détaille très bien la méthodologie d'évaluation de ces émissions (voir Cadre 2). Ainsi, les émissions de CH₄, N₂O

et CO dépendent de la quantité de carbone brûlé et de facteurs dits d'émissions. Les émissions de CO₂ correspondent aux pertes totales de carbone aérien (converti en CO₂ via le facteur de conversion CO₂/carbone). Dans la méthodologie, on considère par ailleurs que la totalité du carbone aérien forestier disparaît, volatilisé dans l'atmosphère sous forme de CO₂, soit par combustion, soit par minéralisation.

ÉQUATION 3.2.19	
ESTIMATION DES EMISSIONS DE GAZ SANS CO₂ A PARTIR DES EMISSIONS DE C	
Émissions de CH ₄ = (carbone émis) • (taux d'émission) • 16/12	
Émissions de CO = (carbone émis) • (taux d'émission) • 28/12	
Émissions de N ₂ O = (carbone émis) • (rapport N/C) • (taux d'émission) • 44/28	

Équation 1: Équations d'émissions de CH₄, CO et N₂O lors de la combustion de la biomasse (GIEC, 2006)

Selon l'Office National des Forêts (ONF), la défriche d'un hectare de forêt en Guyane avec brûlis mène à l'émission de 491 tonnes de CO₂ et de 58 teqCO₂ d'autres gaz (CH₄, NO et CO) par combustion. La décomposition émet, pour sa part, 56 tonnes de CO₂ dans l'atmosphère (ONF, 2010) :

		teqCO₂/ha émis
Émissions sur parcelle liées à la combustion	CO ₂	491
	Autres GES	58
Emissions sur parcelle liées à la décomposition	CO ₂	56
	Autres GES	0
Total (teqCO ₂ /ha)		605

Tableau 2 : Bilan GES de la défriche agricole avec brûlis en Guyane (ONF, 2010)

Cadre 2 : Méthodologie internationale de bilan GES lors d'une suppression de forêt

La comptabilisation des émissions de GES lors d'un changement d'usage des sols est explicitée par le GIEC dans son rapport « Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (GPG-LULUCF) » (2003).

En Guyane, le changement d'usage majoritaire est celui d'une terre forestière transformée en prairie ou terre cultivée. Dans la méthodologie, les variations de stocks de carbone entre les deux états sont calculées, puis multipliées par le facteur de conversion CO₂/C pour déterminer les émissions de CO₂.

De plus, des émissions de CH₄, N₂O, CO et NO_x ont lieu lors de la combustion de la biomasse forestière. On se sert alors du stock de carbone contenu dans la biomasse brûlée et de facteurs d'émissions. Des émissions peuvent également avoir lieu au moment de la décomposition de la matière forestière, lors d'un défrichage sans feu par exemple.

2.2. Défriche sans brûlis avec valorisation énergétique de la biomasse

Il existe en Guyane une réelle ambition de valorisation de la biomasse aérienne pour la production d'énergie, soutenue par les pouvoirs publics. Selon les projections de l'Ademe, l'utilisation de la biomasse pourrait représenter 30 % du mix énergétique du territoire en 2030. Parmi la biomasse utilisée, une partie serait issue de la défriche agricole. Le reste proviendrait de la valorisation des déchets de l'industrie du bois et de la collecte des troncs de la réserve d'eau du barrage de Petit-Saut, complétés par du bois de plantation.

Une étude a ainsi été menée en Guyane afin de vérifier l'impact positif en termes de bilan GES de l'utilisation des bois de défriche agricole pour la production d'énergie. Elle a été conduite par l'ONF et reprise par l'Ademe dans une note sur l'approche du bilan carbone de la biomasse en Guyane (ONF, 2010 ; [note-ademe-approche-bilan-carbone-biomasse-guyane.pdf](#)).

En comptabilisant les émissions à chaque étape de la chaîne, de la défriche à la combustion en centrale, la défriche avec valorisation de la biomasse pourrait représenter une économie d'émissions de GES de 192 teqCO₂/ha, soit une réduction de 30 % de l'impact GES de la défriche agricole par rapport à une défriche sans valorisation de la biomasse (Tableau 2).

	Défriche sans valorisation de la biomasse aérienne et avec brûlis sur parcelle*	Défriche avec valorisation de la biomasse aérienne**
Émissions sur parcelles liées à la défriche agricole (teqCO ₂ /ha)	605	91
Émissions dues au transport (à l'extraction et au raffinage) du combustible (teqCO ₂ /ha)	20	3
Émissions dues à la combustion en centrale (teqCO ₂ /ha)	135	474
Total (teqCO ₂ /ha)	760	568

Tableau 2 : Comparaison des émissions d'une défriche avec et sans valorisation de la biomasse aérienne (Ademe, 2010)

NB : les émissions liées à la combustion du fioul en centrale sont calculées à partir de l'énergie électrique générée par l'utilisation de la biomasse sur 1 ha de forêt et des émissions liées à la production d'un kWh à partir de fioul.

2.3. Défriche sans brûlis suivie de la mise en place d'agroécosystèmes

La combustion de la matière organique provoque des émissions de CH₄ et de N₂O à prendre en compte dans le bilan GES ou carbone lié à la défriche agricole. Or les forêts et les agroécosystèmes sont également sources (ou puits) de CH₄ et de N₂O. Le changement d'usage des sols entraîne donc non seulement des modifications de stocks de carbone, mais aussi des émissions de GES.

Ces variations ont été étudiées en Guyane sur le site de Combi. Une parcelle forestière a été convertie en 2008 en parcelles agricoles à la suite d'une défriche sans brûlis accompagnée d'une importante restitution de biomasse aérienne au sol (Perrin et al., 2014). Trois agroécosystèmes ont été implantés : une prairie de fauche fertilisée et chaulée, un système de cultures annuelles (maïs/soja) avec travail du sol superficiel et un système de cultures annuelles (maïs/soja) sans travail du sol superficiel.

Entre 2011 et 2014, les émissions de N₂O et CH₄ ont été mesurées dans la forêt adjacente et dans les différents agroécosystèmes à l'aide de chambres de mesure de GES (Petitjean, 2013; Petitjean et al., 2015, 2019). Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.

Valeurs exprimées en gN/ha/j	Forêt	Prairie	Cultures	
			Avec travail du sol	Sans travail du sol
Émissions de N ₂ O	2,7 ± 0,3	3,3 ± 0,8	10,0 ± 1,3	9,4 ± 1,7
Émissions de CH ₄	-3,0 ± 1,7	7,5 ± 0,8	1,4 ± 0,7	0,2 ± 0,5

Tableau 3 : Résultats de mesures d'émissions de CH₄ et N₂O faites sur le dispositif de Combi (Petitjean, 2013 ; Petitjean et al., 2015, 2019)

Les émissions de N₂O sont en moyenne les plus importantes dans les cultures annuelles, sans effet significatif du travail du sol. Elles sont réduites dans la prairie et la forêt (Petitjean et al., 2019). Elles sont principalement expliquées par la pratique de fertilisation azotée et l'humidité du sol, avec des émissions plus faibles durant la saison sèche.

Les émissions de CH₄ sont en moyenne les plus élevées pour la prairie tandis qu'elles sont plus faibles pour les cultures annuelles. L'écosystème forêt est, quant à lui, un faible puits de CH₄. Comme pour les émissions de N₂O, les émissions de CH₄ varient selon la saison, avec des émissions de CH₄ plus importantes durant la saison des pluies dans les agroécosystèmes, correspondant aux périodes où l'humidité du sol est la plus importante.

La mise en commun des résultats d'études obtenus sur le site de Combi a permis de calculer le bilan GES/carbone de la transition forêt/agriculture sans brûlis en Guyane. Il prend en compte les pertes de biomasse aérienne à la suite de la déforestation, les variations de stocks de COS à la suite de l'implantation des agroécosystèmes 5 ans après la déforestation (Fujisaki, 2014 ; Fujisaki et al., 2017; Perrin et al., 2014), les comparaisons des émissions de N₂O et CH₄ entre la forêt et les différents agroécosystèmes (Petitjean, 2013 ; Petitjean et al., 2015, 2019) et les mesures des flux de carbone exportés par les eaux de percolation à la suite de la déforestation (Tableau 4).

Pertes de carbone	Quantité (tC/ha)
Pertes de carbone de la biomasse aérienne forestière à la suite de la déforestation	160 - 180
Pertes de carbone du sol dans les systèmes en cultures annuelles constatées 5 ans après déforestation, par rapport à l'état forestier initial	6,3 - 7,6
Pertes de carbone issu des racines et de la litière à la suite de la déforestation	5 - 10
Augmentation des émissions de N ₂ O et CH ₄ entre l'état forestier initial et les cultures annuelles mises en place	<0,8
Pertes de carbone exporté par les eaux de percolation à la suite de la déforestation	>0,01
Pertes totales	172,1 - 198,4

Tableau 4 : Bilan des pertes de carbone liées à la défriche agricole réalisée sur le site de Combi 5 ans après déforestation (Fujisaki, 2014 ; Fujisaki et al., 2017 ; Perrin et al., 2014 ; Petitjean, 2013 ; Petitjean et al., 2015, 2019)

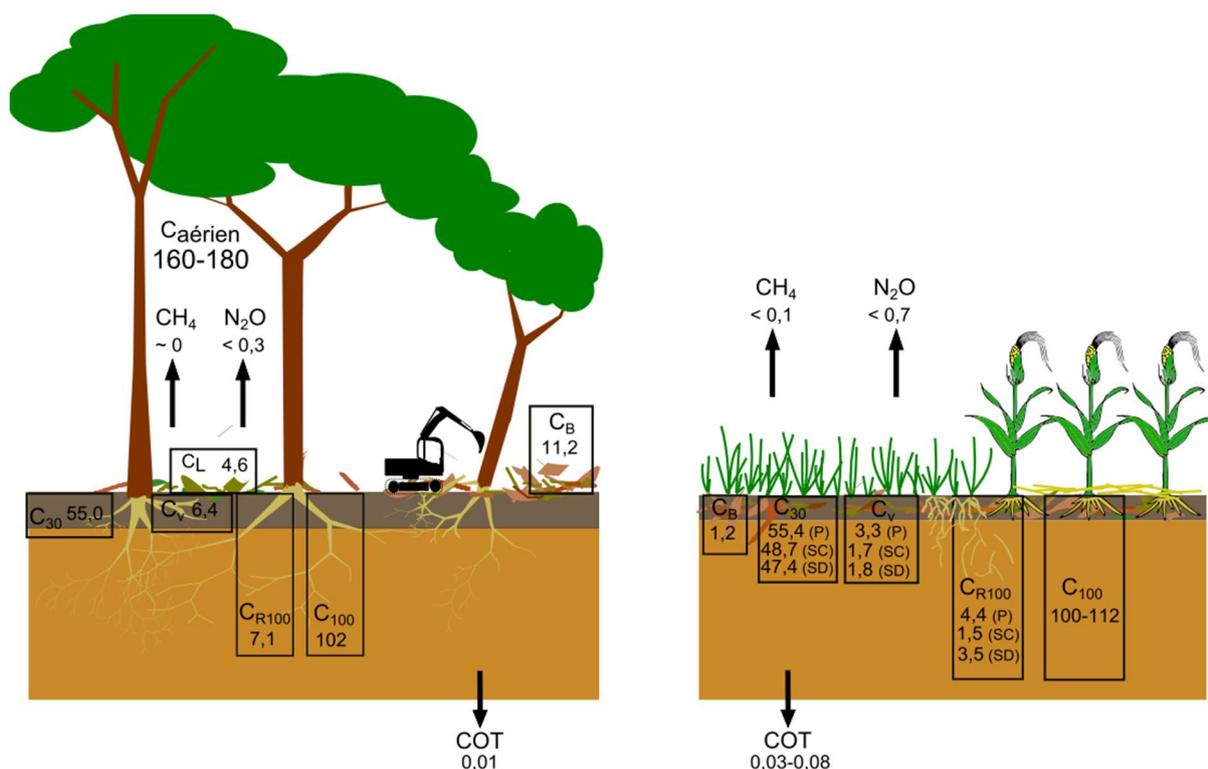


Figure 35 : Stocks (en tC/ha) et flux de carbone et de gaz à effet de serre (en teqC/ha/an) sous forêt et 5 ans après déforestation sur le site de Combi (Fujisaki, 2014)

P = prairie ; SC = semis conventionnel avec travail du sol superficiel ; SD = semis direct ; C_{aérien} : stock de carbone de la biomasse aérienne sous forêt ; C_v = stock de C des refus végétaux du sol > 2 mm dans la couche 0-30 cm ; C₃₀ = stock de COS de la terre fine dans la couche 0-30 cm ; C_{R100} = stock de C racinaire dans la couche 0-100 cm ; C₁₀₀ = stock de COS de la terre fine dans la couche 0-100 cm ; C_B = stock de C des débris de bois apportés par la déforestation (valeurs à T4 - novembre 2012, soit 4 ans après déforestation - dans les sols cultivés) ; C_L = stock de carbone des litières ; COT = flux de C organique total exporté par les eaux de percolation à 60 cm de profondeur, ces valeurs étant exprimées en tC/ha pour les stocks et en tC/ha/ an pour les flux. Les refus végétaux sont les plantes délaissées par le bétail lors du pâturage.

Finalement, rapportées aux variations de stocks de carbone aériens et souterrains à la suite de la déforestation, les émissions de N₂O et CH₄ contribuent de façon modeste au bilan GES de la transition forêt-agriculture observée sur le site de Combi (inférieures à 0,8 teq C/ha/an) (Fujisaki, 2014). Sans prendre en compte les émissions de GES des premiers mois après déforestation, de la production et du transport des intrants agricoles ainsi que du matériel forestier, le site a déjà émis entre 623 et 733 teqCO₂/ha 5 ans après défriche. Ces résultats mettent en exergue l'impact de la défriche agricole sur les émissions de GES ainsi que l'importance d'en faire une utilisation raisonnée.

3. Bilan GES du barrage de Petit-Saut

Le barrage hydroélectrique de Petit-Saut a été construit au début des années 1990 entre les communes de Sinnamary et de St-Elie. Il produit environ 450 kWh/an et alimente une partie de la Guyane en électricité. La mise en eau du barrage en 1994 a entraîné l'immersion de 300 km² de forêt à l'origine d'importantes émissions de GES.

Figure 36 : Photographie aérienne du barrage de Petit-Saut (Vigouroux, 2016)



Depuis la mise en place du barrage, des études d'impact environnemental ont spécialement porté sur le suivi et la quantification de ces émissions. Cela a pu être assuré grâce à des mesures de concentrations de gaz dans l'eau, ainsi que des mesures de gaz émis au-dessus du réservoir et récolté grâce à des chambres à gaz flottantes (Galy-Lacaux et al., 1997 ; Abril et al., 2005 ; Guérin, 2006 ; Descloux, 2013 ; Colas et al., 2020). Au fil du temps, les avancées techniques ont permis d'améliorer les mesures. Depuis les années 2000, la station « Roche Génipa », située dans la partie centrale du réservoir, est le site historique de mesure des concentrations de gaz dissous dans l'eau.

Les résultats produits au cours des différentes études ont été utilisés et complétés par le Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique (Citepa) à l'origine d'une note de synthèse sur les émissions du barrage de la mise en eau à 2030. Ces travaux ont été menés en partenariat avec l'Observatoire du Carbone de Guyane et l'Observatoire de l'Energie, et publiés sur le site de l'Ademe (Citepa, 2016).

3.1. Mécanismes d'émission

Lors de sa mise en eau du barrage, 10 millions de tonnes de carbone organique ont été submergées, dont 58,2 % contenues dans la biomasse forestière (56,2 % dans les troncs et 2 % dans les feuilles) et 41,8 % contenues dans le sol (Galy-Lacaux et al., 1997).

Sous l'eau comme dans l'air, la matière organique est décomposée sous l'action des micro-organismes. En présence de dioxygène, la dégradation par la respiration produit du CO_2 . Or, dans l'eau (y compris dans l'océan), il n'y a plus d'oxygène à partir d'une certaine profondeur. Cette profondeur délimitant les milieux « oxygénés » et « anoxiques » s'appelle l'oxycline (Figure 37). La décomposition de la matière organique en milieu anoxique est faite par les bactéries méthanogènes et mène à la formation de CH_4 .

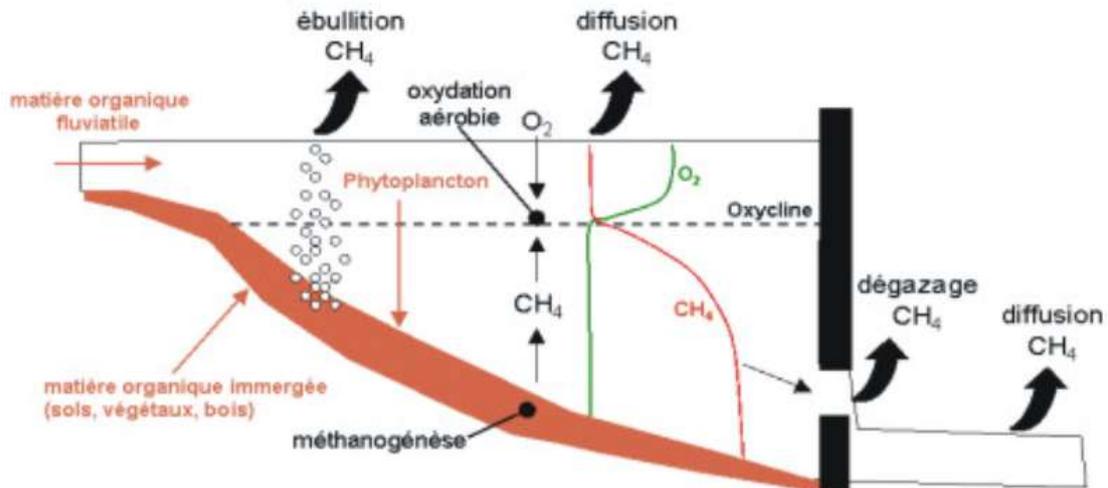


Figure 37 : Processus d'émissions du CH₄ par le barrage de Petit-Saut (source : UMR EPOC - Informations (u-bordeaux.fr), 2023, https://www.epoc.u-bordeaux.fr/index.php?lang=fr&page=actus2_infos&id=1)

Les travaux réalisés dans le réservoir de Petit-Saut ont montré que le CH₄ formé en profondeur s'échappait vers l'atmosphère par 4 voies distinctes (flèches de la Figure 3) et selon 3 mécanismes distincts (ébullition, diffusion, dégazage¹¹). Protégé dans des bulles d'air formées en profondeur, il traverse la colonne d'eau jusqu'à la surface et est émis par ébullition (Figure 37). Le CH₄ libre est émis par diffusion. Fort heureusement, 90 % du CH₄ total produit dans la réserve de Petit-Saut est oxydé en CO₂ par des bactéries méthanotrophes au niveau de l'oxycline (Guérin, 2006).

Cadre 3 : Pourquoi ce barrage pollue-t-il particulièrement ?

La plupart des points d'eau possèdent une profondeur à partir de laquelle les rayons du soleil ne permettent plus d'alimenter les organismes photosynthétiques, rendant le milieu pauvre en O₂. Pourtant, ils ne sont pas tous qualifiés d'usines à CH₄. Certains facteurs expliquent les très forts taux d'émission de GES des barrages hydrauliques, notamment ceux construits en milieux tropicaux.

En effet, si, l'abondance de matière organique inondée est le principal moteur d'émission, l'augmentation de la température des eaux diminue la solubilité des gaz et favorise leurs flux vers l'air. Enfin, indépendamment du climat, la profondeur de la réserve d'eau conditionne la pression hydrostatique qui déstabilise les bulles remontantes de CH₄ (Guérin, 2006)

¹¹ Le dégazage au niveau des turbines, où transitent des eaux de fond très riches en méthane, est lié au changement brusque de pression hydrostatique entre la retenue et la rivière en aval. A Petit-Saut, un seuil aérateur assure la réoxygénation des eaux et favorise encore davantage le dégazage.

3.2. Evolution des émissions depuis la mise en eau

Lors de la mise en eau du barrage, le carbone contenu dans la biomasse facilement dégradabile (les feuilles des arbres tombées, par exemple) a d'abord été très rapidement dégradé. Cette dégradation a été à l'origine d'un pic d'émissions les années qui ont suivi la mise en eau (Figure). La minéralisation de la biomasse facilement dégradabile du sol a aussi contribué à ce pic d'émissions.

A mesure que cette matière organique a disparu, les émissions du barrage ont chuté (Figure). On estime que l'intégralité du carbone contenu dans les feuilles des arbres a disparu en maximum 4 ans après la mise en eau (comm. pers. F. Colas, Univ. C. Bernard, Lyon 1). Aussi, à ce jour, la moitié du COS aurait été émise.

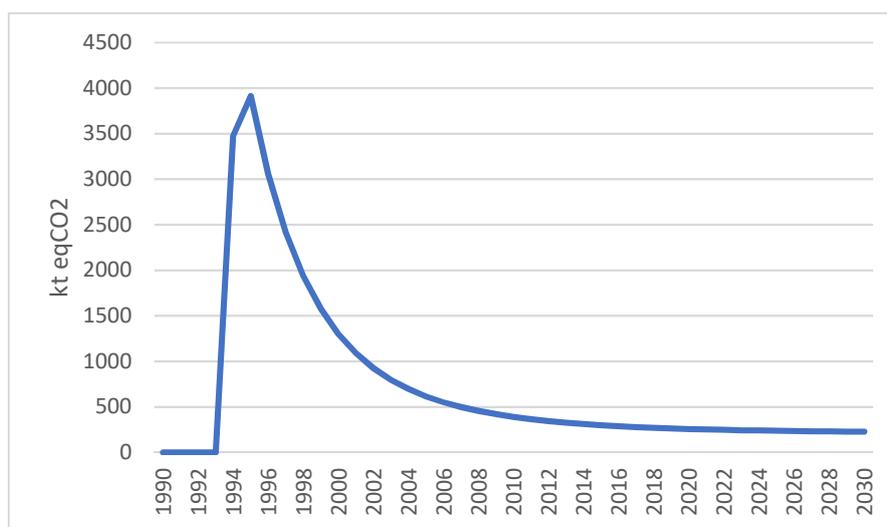


Figure 4 : Evolution des émissions de GES de la retenue du barrage de Petit-Saut entre 1990 et 2030 (Citepa, 2006)

Finalement, le compartiment qui représente encore une importante quantité de C organique dans la retenue est celui constitué par les troncs. Or il existe peu d'espèces capables de dégrader des structures moléculaires telles que la lignine, présente en quantité dans les troncs des arbres, et ce même sous l'eau. Si on estime que 20 % de la partie aérienne du réservoir a été perdue, on ne sait pas la quantité de C dégazé dans l'atmosphère. Une partie de cette perte correspond en effet aussi à la chute des arbres dans l'eau.

Ces résultats se révèlent être une bonne nouvelle dans l'évolution des émissions du barrage de Petit-Saut mais doivent être considérés avec attention. En effet, l'avancée des techniques scientifiques a permis d'identifier de nouvelles sources potentiellement dégradables de C organique dans le réservoir. Par exemple, de récents prélèvements ont permis la découverte de litières de l'âge de la mise en eau au milieu de la retenue, alors que les scientifiques pensaient qu'elles avaient été très rapidement dégradées (comm. pers. F. Colas, Univ. C. Bernard, Lyon 1).

En outre, les analyses des séries chronologiques des concentrations de gaz à Roche Génipa suggèrent une diminution de la contribution de la matière organique inondée initialement aux émissions, et une augmentation de celle de matières autochtones (Colas et al., 2020). Cette autre source de carbone, issue du phytoplancton, des algues périphériques et des apports fluviaux en provenance des écosystèmes terrestres est encore peu quantifiée et intégrée dans les bilans (Colas et al., 2020).

4. Bilan GES de diverses activités agricoles

4.1. La production bovine

ACCT-DOM est un outil de bilan GES et carbone des exploitations agricoles (voir Cadre 4). Il prend en compte les émissions de CH₄ issues de la fermentation entérique et de la gestion des déjections, les émissions de N₂O issues des sols agricoles, ainsi que les émissions de CO₂ dues à l'utilisation de sources d'énergie sur l'exploitation (essence, bois, etc.) mais aussi à la fabrication et au transport des intrants. Son utilisation en Guyane sur 33 exploitations réparties le long du littoral a permis de dresser le bilan GES et carbone de différentes activités agricoles (Figure 5). L'activité d'élevage bovin allaitant est celle dont les résultats sont les plus aboutis et sont présentés ici¹².

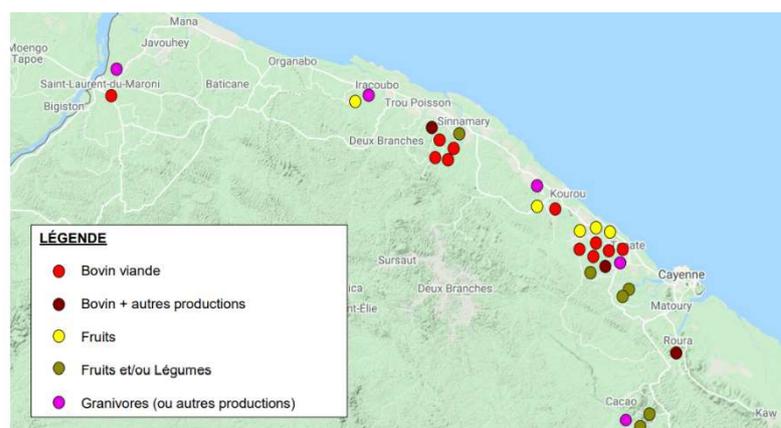


Figure 5 : Localisation des diagnostics ACCT-DOM de Guyane entre 2015 et 2018 (source : [Blanfort, 2015](#))

Dallaporta et al. (2016) montrent ainsi que les émissions des ateliers bovins viande guyanais sont comprises entre 49,2 et 1 417,3 teqCO₂/an, avec une moyenne de 564,5 teqCO₂/an. Exprimées en teqCO₂, la grande majorité des émissions proviennent de phénomènes naturels, avec 63 % issues de la fermentation entérique des animaux et 19 % de la minéralisation de l'azote par les bactéries du sol (Tableau 55).

Postes	Intrants			Animaux		Sols agricoles	Autres
	Energie directe	Engrais	Aliments bétail	Fermentation entérique	Déjections		
	6 %	1,5 %	2 %	63 %	4 %	19 %	5,5 %

Tableau 5 : Part des émissions moyennes par poste des exploitations d'élevage bovin viande en teqCO₂ (Dallaporta et al., 2016)

Le calcul des émissions annuelles ramenées à l'hectare permet de s'affranchir de l'effet taille des exploitations. Elles sont estimées à 4,6 teqCO₂/ha en moyenne. C'est légèrement plus

¹² Les résultats des autres ateliers sont disponibles dans les livrables du projet ACCT DOM.

faible que la moyenne métropolitaine, qui s'élève à 5,6 teqCO₂/ha¹³ (PLANETE®, 2010). L'élevage bovin guyanais repose en effet sur des systèmes à l'herbe, avec peu d'intrants.

En revanche, les chiffres mettent en lumière le manque de productivité de l'activité (liée aux races locales, aux variétés de fourrages, à la technicité de reproduction et d'alimentation, etc.), avec des émissions estimées à 27,1 teqCO₂/tonne de poids vif. Cela représente deux fois plus d'émissions par tonne commercialisable produite que dans les exploitations de métropole (PLANETE®, 2010) (Tableau).

	Bilan/ha	Efficience
Guyane	4,6 teqCO ₂ /ha	27,1 teqCO ₂ /t de poids vif
Métropole	5,6 teqCO ₂ /ha	14,4 teqCO ₂ /t de poids vif

Tableau 6 : Comparaison des bilans d'émissions de GES par ha et des efficacités d'émission entre la Guyane et la métropole (PLANETE®, 2010)

Cadre 4 : L'outil ACCT-DOM

ACCT (Agri Climate Change Tool) est un outil de diagnostic énergétique et des émissions de GES à l'échelle de l'exploitation agricole. Il est le fruit d'un projet européen mené par Solagro et ses partenaires et a été testé sur plus de 120 fermes dans 4 pays européens de 2010 à 2013. Il permet, à l'issue des diagnostics, de proposer aux agriculteurs des leviers d'actions de réduction des émissions de GES et de consommations énergétiques sur leur exploitation agricole.

ACCT-DOM est une adaptation de ACCT pour les exploitations agricoles des DOM. Utilisé depuis quelques années pour les diagnostics énergie-GES des exploitations agricoles des DOM (Martinique, Guadeloupe, La Réunion), le contexte particulier de la Guyane (une des seules régions françaises où il y a de la déforestation) a nécessité une adaptation de l'outil.

Tout d'abord, les travaux menés dans le cadre du projet CARPAGG ont permis une avancée de l'outil afin de prendre en compte le stockage de carbone dans les prairies âgées de plus de 20 ans, avec 1,73 tC stockées par ha (Stahl et al., 2013). La méthodologie de calcul des émissions liées à la déforestation repose sur les recommandations internationales du GIEC (GIEC, 2006). Elle s'appuie sur le calcul des pertes de carbone dans la biomasse vivante et le sol liées à la transition entre l'état forestier et l'état prairial. La variation de stock de carbone est ensuite convertie en CO₂. Les GES (CH₄ et N₂O) s'échappant dans l'atmosphère au moment de la combustion de la biomasse forestière sont également comptabilisés.

A l'époque de l'utilisation d'ACCT-DOM en Guyane, le bilan GES lié à la déforestation ainsi que le stockage de carbone dans le sol des prairies n'avaient pas été intégrés aux bilans des exploitations. Dans les grands domaines, le stockage permettait de compenser les émissions de la ferme. En revanche, avec des émissions comprises entre 18 et 77 teqCO₂/ha/an en fonction de l'ancienneté de la déforestation (Dallaporta et al., 2016), on note tout de suite l'impact de la déforestation de 100 ha de forêts dans le bilan d'une exploitation agricole.

L'outil est actuellement mis en œuvre en Guyane dans le cadre de l'appel à projets de l'Ademe « Bon diagnostic Carbone ».

¹³ Catégorie naisseurs-engraisseurs.

4.2. Les systèmes herbagers à l'échelle de la parcelle

Le projet CARPAGG, dont les résultats sont regroupés dans Blanfort et al. (2013), bien que centré en premier lieu sur l'étude et le suivi du carbone dans des prairies issues de la déforestation, a aussi permis de capitaliser des données sur les émissions de CH₄ et le N₂O. Ces données ont permis d'approfondir les investigations menées sur l'effet du passage d'une forêt à une prairie pâturée.

Des mesures ont été réalisées sur les mêmes parcelles des dispositifs de tours à flux que celles qui ont permis de mesurer les flux de CO₂. Pour rappel, les tours ont été installées sur deux prairies pâturées d'âges contrastés, avec un système de gestion semi-extensif (chargement moyen = 1 mère/ha et une faible utilisation d'intrants). Les flux de N₂O ont été mesurés directement via des analyseurs de gaz en chambres statiques et les flux de CH₄ ont été estimés indirectement par mesure de l'azote excrété dans les fèces. Des équations permettant de relier la quantité d'azote excrétée à l'azote ingéré digestible puis au méthane émis lors de la digestion ont été utilisées. Les résultats ont été convertis en teqCO₂ puis tC afin de pouvoir établir un bilan :

Valeurs exprimées en tC/ha/an	Prairie ancienne	Prairie jeune
Flux de CH ₄ des bovins	+1,83	+3,59
Flux de N ₂ O du sol	+0,48	+1,13
Flux net de CO ₂ du sol	-6,59	-1,57
Bilan GES net (tC/ha/an)	-4,28	+3,15

Tableau 7 : Bilan annuel moyen 2011 - 2012 des flux de GES à l'échelle de la parcelle (Blanfort et al., 2013)

NB : Par convention, les signes + représentent une perte de carbone et les signes – un stockage.

Les auteurs ont ainsi montré que la prairie ancienne était capable de compenser largement les émissions de CH₄ et de N₂O du fait d'un stockage important de carbone dans ses sols. La prairie jeune, du fait d'un stockage de carbone plus faible et des émissions en méthane particulièrement élevées¹⁴, présentait un bilan GES final émetteur.

4.3. Arboriculture et maraîchage

Courte (2019) a participé à la calibration de l'outil ACCT-DOM en mesurant les émissions GES de 3 catégories d'activités agricoles guyanaises : l'arboriculture à faible impact, le maraîchage à faible impact et le maraîchage à forts intrants (Tableau 8). Le projet visait initialement à comparer le bilan produit par l'outil à celui produit par l'outil Ex-Act de la FAO, mais ce dernier n'a pas été utilisé finalement. L'agriculture à forts intrants est le type d'agriculture la plus émettrice de CO₂.

¹⁴ Dans cette exploitation, le taux de chargement était particulièrement haut pour la période.

	Arboriculture à faible impact	Maraîchage à faible impact	Maraîchage à forts intrants
Bilan (teqCO ₂ /ha)	0,4 à 3	1 à 3	4,25 à 6,2

Tableau 8 : Résultats de bilan GES des activités agricoles testées par Courte (2019)

NB : Des entretiens ont été menés dans 25 exploitations, mais seulement 9 d'entre elles ont été retenues, en raison d'un manque de données dans les autres.

Bibliographie

- Abril, G., et al. (2005). Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit-Saut, French Guiana). *Global Biogeochemical Cycles* 19(4) : 1-16.
- Blanfort V. (2015). ACCT-DOM Guyane Outil de diagnostic Energie / Carbone des exploitations agricoles de Guyane
- Blanfort, V. Stahl, C., Klumpp, K., Fontaine, S., Cochard, C., Falcimagne, R., Bloor, J., Lecomte, P., Jobin, M., Thierriot, P., Boval, M. (2013). Bilan de carbone de prairies issues de déforestation en Amazonie française (Guyane). Journées Professionnelles AFPF 2013 : Prairies, systèmes fourragers et changement climatique, Paris, France
- Bochu, J.-L., Bordet, A.-C., Métayer, N., Trévisiol, A. (2010). Références PLANETE 2010, Fiche 1- Généralités : présentation des exploitations et résultats globaux. Toulouse : SOLAGRO, 2010, 29 p.
- https://solagro.org/images/imagesCK/files/publications/f45_1refplanetegeneralites.pdf
- Bréchet, L., Courtois, E.A., Saint-Germain, T., Janssens, I.A., Asensio, D., Ramirez-Rojas, I., Soong, J.L., Van Langenhove, L., Verbruggen, E. and Stahl, C. (2019). Disentangling Drought and Nutrient Effects on Soil Carbon Dioxide and Methane Fluxes in a Tropical Forest. *Front. Environ. Sci.* 7:180. doi: 10.3389/fenvs.2019.00180
- Bréchet, L.M., Daniel, W., Stahl, C., Burban, B., Goret, J.-Y., Salomón, R.L., Janssens, I.A. (2021). Simultaneous tree stem and soil greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) flux measurements : a novel design for continuous monitoring towards improving flux estimates and temporal resolution. *New Phytol.* 2021 Jun; 230(6) : 2487-2500. doi: 10.1111/nph.17352. Epub 2021 Apr 19. PMID: 33738819
- Colas, F., Chanudet, V., Daufresne, M., Buchet, L., Vigouroux, R., Bonnet, A., et al. (2020). Spatial and temporal variability of diffusive CO₂ and CH₄ fluxes from the Amazonian reservoir Petit-Saut (French Guiana) reveals the importance of allochthonous inputs for long-term C emissions. *Global Biogeochemical Cycles*, 34, e2020GB006602. <https://doi.org/10.1029/2020GB006602>
- 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 (Thèse de doctorat). Université de la Guyane. 204 p. <https://www.theses.fr/2019YANE0010>
- Courtois, E., Stahl, C., Van den Berge, J., Bréchet, L., Van Langenhove, L., et al. (2018). Spatial Variation of Soil CO₂, CH₄ and N₂O Fluxes Across Topographical Positions in Tropical Forests of the Guiana Shield (vol 21, pg 1445, 2018). *Ecosystems, Springer Verlag*, 2019, 22 (1), pp.228-228. (10.1007/s10021-018-0281-x). (hal-02622594)
- Dallaporta, B., Bochu, J.-L., Vigne, M., Ouliac, B., Zoogones, L., Lecomte, P., Blanfort, V. (2016). Taking into account carbon sequestration of pasture in carbon balance of cattle ranching systems established after deforestation in Amazonia. In : Proceedings of the 10th International Rangeland Congress. Iwaasa Alan (ed.), Lardner H.A. (Bart) (ed.), Schellenberg Mike (ed.), Willms Walter (ed.), Larson Kathy (ed.). Saskatoon : IRC, 399-401. ISBN 978-1-77136-458-4 International Rangeland Congress : "The future management of grazing and wild lands in a high-tech world ". 10, Saskatoon, Canada, 16 Juillet 2016/22 Juillet 2016
- Daniel, W., Stahl, C., Burban, B., Goret, J.-Y., Casal, J., Janssens, I.A., and Bréchet, L. (2021). Inter-specific variations in tree stem methane and nitrous oxide exchanges in a tropical rainforest, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-13260, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13260>

- Descloux, S. (2013). Mise à jour de données de la thèse de F. Guérin pour le barrage de Petit-Saut, EDF
- 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 245, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.011>
- Fujisaki, K. (2014). Devenir des stocks de carbone organique des sols après déforestation et mise en culture : une analyse diachronique en contexte amazonien (Thèse de doctorat). Montpellier SupAgro
- Galy-Lacaux, C., et al. (1997). Evolution temporelle des émissions gazeuses et des profils de gaz dissous. Estimation du bilan de carbone de la retenue de Petit-Saut deux ans après sa mise en eau. *Hydroécologie Appliquée* 9 : 85-114
- GIEC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Chapter 4 « Forest Land». https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_04_Ch4_Forest_Land.pdf
- Guerin, F. (2006). Greenhouse gases (CO₂, CH₄) emissions from a tropical hydroelectric reservoir (Petit-Saut, French Guiana) : experimentation and modeling. Available from INIS: http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:51079030
- Khalil, K., Renault, P., Guerin, N., Mary, B. (2005). Modelling denitrification including the dynamics of denitrifiers and their progressive ability to reduce nitrous oxide: Comparison with batch experiments. *European Journal of Soil Science - EUR J SOIL SCI.* 56. 491-504. 10.1111/j.1365-2389.2004.00681.x
- ONF (2010). Etude de synthèse bibliographique sur la production de gaz à effet de serre liée au défrichement agricole en Guyane, J. Demenois, Y-M. Gardette, A.Giraud, M.Rubio, version provisoire du 27 janvier 2010. <https://guyane.ademe.fr/sites/default/files/etude-production-ges-defrichement-agricole-guyane.pdf>
- 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? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 184, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.009>
- Petitjean, C. (2013). Mesures in situ et simulations des flux de N₂O émis par les sols. Cas du changement d'usage des terres en Guyane : déforestation par la méthode 'chop-and-mulch' suivie de la mise en valeur agricole (Thèse de doctorat). Université des Antilles et de la Guyane, France
- Petitjean, C., Le Gall, C., Pontet, C., Fujisaki, K., Garric, B., Horth, J.-C., Hénault, C., Perrin, A.-S., 2019. Soil N₂O, CH₄, and CO₂ Fluxes in Forest, Grassland, and Tillage/No-Tillage Croplands in French Guiana (Amazonia). *Soil Syst.* 3, 29. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020029>
- Petitjean, C., Hénault, C., Perrin, A.-S., Pontet, C., Metay, A., Bernoux, M., Jehanno, T., Viard, A., Roggy, J.-C. (2015). Soil N₂O emissions in French Guiana after the conversion of tropical forest to agriculture with the chop-and-mulch method. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 208, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.004>
- Welch, B., Gauci, V., Sayer, E. (2018). Tree stem bases are sources of CH₄ and N₂O in a tropical forest on upland soil during the dry to wet season transition, 25, 10.1111/gcb.14498, *Global Change Biology*