

CARBONE des Paturages de Guyane et Gaz à effet de serre



ACTES DE LA JOURNÉE

« LE CARBONE EN FORÊT ET EN PRAIRIES ISSUES DE DÉFORESTATION
EN GUYANE,
PROCESSUS, BILANS ET PERSPECTIVES »
1^{er} OCTOBRE 2013,
CAYENNE, GUYANE FRANÇAISE

Vincent Blanfort, Clément Stahl (Eds)

Editeurs scientifiques

Vincent Blanfort ^(1,2), Clément Stahl ^(1,2)

1. CIRAD UMR Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux (Selmet)
Campus international de Baillarguet , TA C-18, 34398 Montpellier Cedex 5, France
<http://umr-selmet.cirad.fr/>
tel : +33 (0)4 67 59 37 62

2. CIRAD UMR Selmet, BP 701 - 97387 Kourou Cedex – Guyane
Tél : +594 (0)5 94 32 73 50 - Fax : +594 (0)5 94 32 73 51

blanfort@cirad.fr, clement.stahl@yahoo.fr

Comment citer ce document :

Blanfort V & Stahl C (eds), 2013. Actes du séminaire « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Cirad, Montpellier, France, 76 p.

Les communications publiées dans cet ouvrage sont des contributions des participants à la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives » qui s'est déroulée le 1^{er} octobre 2013 à Cayenne (Guyane française).

Mise en page des actes : Romain Garcia chargé de mission communication - Direction régionale Antilles-Guyane.

La publication de ces actes a été réalisée dans le cadre du projet CARPAGG (CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre), cofinancé par le Fonds européen de développement régional (Feder PO 2007-2013) et le Cirad.

Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>

ISBN 978-2-87614-696-9

Cirad, 2013



Sommaire

Avant propos

Introduction

Session 1. Le contexte

10 Le projet CARPAGG

BLANFORT V

14 Changement climatique et gaz à effet de serre en agriculture

PICON-COCHARD C & SOUSSANA J.F.

18 Elevage, gaz à effet de serre et changements d'utilisation du territoire

LECOMTE Ph. & BLANFORT V

Session 2. Les flux de CO₂ : comment se réalise le stockage de C dans les écosystèmes forestiers et prairiaux ? Quels sont les processus d'entrée du C ?

24 Quelques éléments de théorie sur la mesure des flux de C dans les écosystèmes

FALCIMAGNE R

28 Flux et bilan de carbone en forêt tropicale humide guyanaise : le dispositif « Guyaflux »

BURBAN B & BONAL D

32 Flux de C échangés entre l'écosystème prairial et l'atmosphère en Amazonie française

STAHL C, KLUMPP K, FALCIMAGNE R, PICON-COCHARD C & BLANFORT V

Session 3. Les stocks de carbone et leurs dynamiques dans les différents compartiments des écosystèmes forestiers et prairiaux

38 Stocks de C dans les forêts tropicales humides Forêts naturelles & Reconstitutions post-exploitation

HERAULT B, FREYCON V & MOLTO Q

42 Dynamique du carbone dans les sols de prairies issues de la déforestation de la forêt guyanaise

BLANFORT V, PONCHANT L, DEZECACHE C, FREYCON V, PICON-COCHARD C, BLANC L, FONTAINE S & STAHL C

Session 4. Vers la réalisation de bilans Carbone et gaz à effet de serre (GES)

48 Actions de l'ADEME en termes de bilan gaz à effet de serre : outils et méthodes pour l'agriculture et la forêt

FEIX I

52 Guyasim, un outil d'aide à la décision pour évaluer des services écosystémiques de la forêt guyanaise

DOLLEY T, BLANFORT V, CORNU G, HERAULT B & ROSSI V

56 Bilan carbone et gestion forestière de Guyane

DESCROIX L, BRUNAUX O & BEZARD V

60 Bilan de carbone de prairies issues de déforestation en Amazonie française (Guyane)

BLANFORT V, STAHL C, KLUMPP K, FONTAINE S, PICON COCHARD C, FALCIMAGNE R, BLOOR J, LECOMTE P, JOBIN M, THIERRIOT P & BOVAL M

64 Vers un observatoire guyanais du carbone et des gaz à effet de serre (GES)

SIRDER H & OULIAC B

68 La déforestation et le changement d'utilisation des terres en Amazonie brésilienne

BLANC L, GRISE M.M. & de CARVALHO C.R

70 Conclusion, Synthèse, Enjeux et perspectives

72 Liste des participants

73 Liste des intervenants

74 Remerciements

Avant propos

Beaucoup de communications et de documents sur la Guyane commencent par en rappeler ses caractéristiques : son étendue, son statut particulier de seule forêt tropicale de l'Union Européenne et bien entendu sa couverture forestière, l'une des mieux préservée du monde. Pourtant, bien peu mettent en avant l'incroyable richesse que représente cet écosystème au regards des grands enjeux mondiaux, particulièrement celui du changement climatique et du développement durable.

A ce titre, la Guyane, constitue un stock de carbone non négligeable. Néanmoins, en dehors de cette assertion dictée par l'évidence, force est de constater que les travaux scientifiques sur cette thématique sont encore peu nombreux concernant les forêts tropicales. La Guyane représente en l'occurrence un territoire d'excellence en la matière, et les travaux de recherche qui y sont menés sont régulièrement cités comme exemples, particulièrement ces dernières années.

Au-delà de cette excellence en matière de recherche, portée par des acteurs scientifiques comme le CIRAD, la journée carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, dont les interventions et conclusions sont présentées dans le présent ouvrage, représente une réelle avancée dans le domaine. En effet après plusieurs années d'études sur la forêt guyanaise, cette journée a permis de faire un point des connaissances et de débattre notamment des impacts environnementaux en matière de carbone générés par les activités humaines. Il est question d'assurer un développement économique et social nécessaire aux populations de la Guyane en fournissant des éléments aux décideurs locaux pour adapter ce développement : le rendre plus respectueux de l'environnement, moins impactant, sans pour autant nuire aux aspects économiques, en d'autres termes, plus durable.

Ce beau projet aura permis d'apporter des éléments scientifiques et mesurables qui pourront contribuer à orienter l'action publique et le développement du territoire dans les années à venir.

Hélène SIRDER, 2ème Vice-Président de la Région Guyane – Présidente de l'Observatoire Régional de l'Energie et du Développement Durable.

Introduction

Dans le cadre du séminaire de restitution du dispositif de recherche CARPAGG « CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre », une journée consacrée au carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, a été organisée par le Cirad le mardi 1^{er} octobre 2013 à Cayenne, à la cité administrative régionale en lien avec ses partenaires et le soutien actif de la Région Guyane.

Le projet CARPAGG cofinancé par le Cirad et le Fonds Européen de développement régionaux (Feder PO 2007-2013) est piloté par l'UMR Selmet (Systèmes d'Elevage Méditerranéens et Tropicaux). Il s'appuie sur un partenariat diversifié avec des équipes de recherche de Guyane (Cirad / Inra / UMR ECOlogie de la FOrêt Guyanaise), de métropole (Inra Clermont Ferrant Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial), des Antilles (Inra Unité de Recherche Zootechnique) et des acteurs locaux.

Au-delà de la restitution des résultats de la phase actuelle de financement du projet CARPAGG, l'objectif de cette journée visait à aborder la thématique carbone dans le cadre plus large du changement d'utilisation des terres dans l'environnement scientifique de la Guyane et de l'Amazonie. La déforestation pour la mise en place de prairies constitue un changement radical d'usage du sol qui impacte durablement la production de services écosystémiques, notamment ceux liés au cycle du C.

Des chercheurs de Guyane et de métropole (Cirad, Inra, EcoFoG) et du Brésil (Embrapa), des intervenants locaux (Onf) et de France métropolitaine (Ademe) ont présenté aux collectivités locales, aux institutions, filières et associations concernées l'état actuel des connaissances sur les flux et stocks de carbone en forêts et en prairies amazoniennes et leur mobilisation dans la réalisation de bilan carbone. L'accent a été mis sur les résultats des recherches menées en Guyane.

Ces actes reprennent les interventions des participants. A l'image de cette journée, ils sont organisés en une session introductive suivie de 3 sessions thématiques :

- La session 1 introductive présente les éléments contextuels de cette journée avec d'abord deux interventions rappelant les enjeux globaux de l'élevage, de l'agriculture vis-à-vis du changement climatique et du changement d'utilisation des terres. La journée organisée dans le cadre de la restitution du projet de recherche CARPAGG, une présentation des caractéristiques et des objectifs du dispositif constitue un préalable aux résultats qui en sont issus et qui sont développés dans les sessions suivantes en lien avec les résultats des dispositifs de recherche partenaires du projet.
- La session 2 est consacrée aux flux de CO₂ dans les écosystèmes forestiers et prairiaux. Elle aborde les processus d'entrée et de stockage du C dans les écosystèmes forestiers et les prairies issues de déforestation.
- La session 3 aborde la résultante de ces flux : les stocks de carbone et leurs dynamiques dans les différents compartiments des écosystèmes forestiers et prairiaux.
- Enfin la session 4 parcourt avec quelques exemples comment les références établies sur les flux et les stocks peuvent être mobilisées pour la réalisation de bilans Carbone et gaz à effet de serre (GES) dans divers outils à différentes échelles.

La journée a été clôturée par un débat final et une synthèse où les résultats ciblés sur les processus biologiques et les outils de bilan sont replacés par rapport à des dimensions plus socio-économiques et politiques (politique publique, aménagement et gestion du territoire, développement des filières forêts et agricoles, bilan carbone).

SESSION 1.

Le contexte



Le développement de l'élevage est à l'origine de profonds changements des espaces terrestres. Plus ou moins stabilisés en régions tempérées, ces changements se sont accélérés dans le monde tropical au cours des 3 dernières décennies soit par l'extension et l'évolution rapide des zones vouées à l'élevage, soit par une pression accrue sur les ressources naturelles. Les répercussions de l'élevage se traduisent également à travers les changements climatiques, selon la FAO, il contribue en 2013 à 14,5% des émissions de GES anthropiques (Photo : V.Blanfort).



En Guyane, l'expansion en cours des systèmes d'élevage sur la forêt doit être accompagnée par des recherches génériques sur une gestion durable des pâturages en Amazonie. (Photo : V.Blanfort).

Le dispositif CARPAGG : Carbone des pâturages de Guyane et gaz à effet de serre

BLANFORT V^{1,2}

¹ CIRAD UMR SELMET, Campus international de Baillarguet - TA C-18, 34398 Montpellier Cedex 5, France

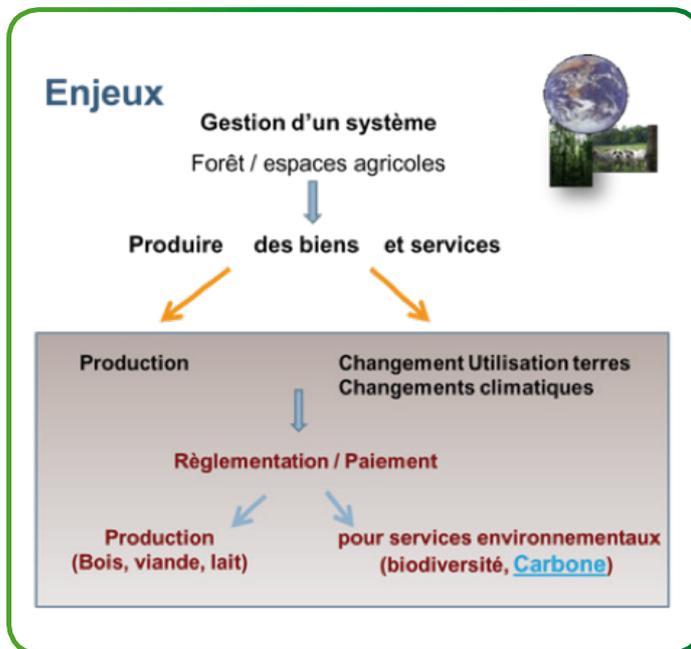
² CIRAD UMR SELMET, BP 701, 97387 Kourou Cedex, Guyane française

Elevage, changement d'utilisation des terres, bilan carbone, GES

Dans le cadre des grands enjeux actuels de l'agriculture, les systèmes herbagers de Guyane remplissent des fonctions productives et environnementales. La déforestation pour la mise en place de prairies constitue un changement radical d'usage de la terre qui impacte durablement la production de services écosystémiques, notamment ceux liés au cycle du C.

Le projet CARPAGG mis en place en 2010, répond à ces enjeux en Guyane où le développement agricole doit se raisonner dans le cadre de la protection du patrimoine forestier et des mesures actuelles d'atténuation des GES qui concernent notamment l'agriculture. L'élevage de ruminant est particulièrement concerné puisqu'il occupe 25 % de la surface agricole utile de la Guyane dont une partie est issue de déforestation. Le doublement prévu de la population guyanaise d'ici 2030, implique un développement endogène du territoire pour répondre aux besoins alimentaires croissants (le secteur bovin ne couvre actuellement que 20% de la consommation de viande du département).

L'expansion en cours des systèmes d'élevage sur la forêt doit être accompagnée par des recherches génériques sur une gestion durable des pâturages en Amazonie, conciliant production de fourrage et services environnementaux tel que le stockage de C dans la matière organique du sol (MOS). La séquestration de carbone dans le sol n'a en effet pas uniquement un intérêt dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique. Les MOS sont également une source d'énergie et de nutriments ; stockage de carbone, activité biologique et fertilité du sol sont ainsi étroitement liés et contribue à la productivité des écosystèmes.



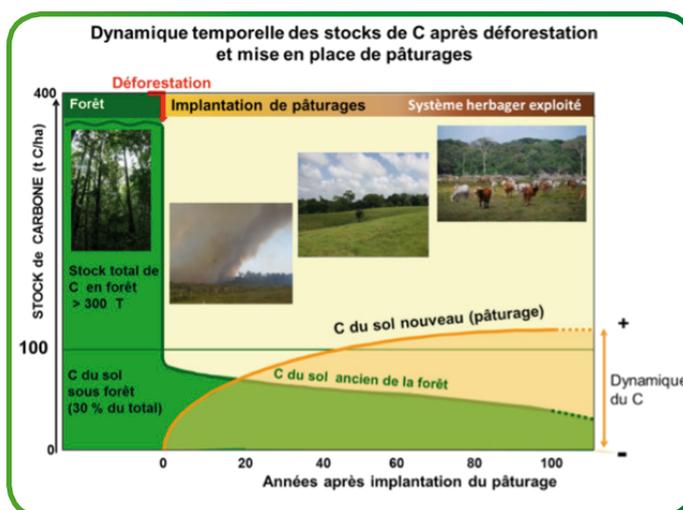
Problématiques et question de recherche

Au-delà de l'effet indéniable de la déforestation et du changement du mode d'occupation des sols sur les pertes de carbone, CARPAGG cherche à identifier et à comprendre les mécanismes biologiques et les pratiques des éleveurs impliquées dans le maintien / la reconstitution des stocks de C après déforestation et mise en place de pâturages.

Objectifs du projet

- Ces recherches participent aux questions scientifiques globales sur le rôle des écosystèmes herbagers dans le réchauffement climatique (émission / atténuation des GES).

CARPAGG contribue à créer en Guyane une plateforme régionale de recherche originale sur la question des bilans C et GES en forêt et sur zones déforestées.



Les systèmes herbagers sont étudiés en lien avec les sites forestiers d'origines (témoins) qui sont aussi l'objet de recherches sur des bilans C et GES (projets Guyaflux, Guyafor, Guyasim, UMR EcoFoG). La Guyane présente une situation unique où les choix de développement peuvent être raisonnés à partir de la préservation d'écosystèmes naturels et leurs réponses à l'exploitation et à leur transformation. Ces connaissances sur l'anthropisation des systèmes ont été acquises expérimentalement grâce à une présence des centres de recherche depuis plusieurs décennies. Le dispositif CARPAGG est une contribution plus récente et complémentaire à cette production de connaissances et de références sur le fonctionnement des systèmes forestiers et déforestés.

- Le dispositif vise à accompagner le développement de l'élevage en Guyane dans le contexte fortement évolutif de l'adaptation de l'agriculture au Changement Global et du changement d'utilisation des terres.

En Amazonie, la faible durabilité des systèmes de remplacement de la forêt est un problème crucial. Stockage de C et maintien de la fertilité sont interdépendants et il est important de comprendre, comment favoriser la séquestration de C dans la matière organique du sol en synergie avec des productions fourragères durables et suffisamment productives pour contribuer à un développement de la filière bovine en Guyane respectueux de l'environnement.

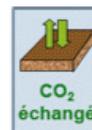
La Guyane présente une situation unique où les choix de développement peuvent être raisonnés à partir de la préservation d'écosystèmes naturels et leurs réponses à l'exploitation et à leur transformation. Ces connaissances sur l'anthropisation des systèmes ont été acquises grâce à une présence des centres de recherche depuis plusieurs décennies. Le projet CARPAGG est une contribution plus récente et complémentaire à cette production de connaissances et de référence sur le fonctionnement des systèmes forestiers et déforestés.

Une approche basée sur des méthodes originales et complémentaires

Les dispositifs de mesure et d'observation sont mis en place en situation réelle chez des éleveurs bovins collaborant au projet. Les systèmes herbagers étudiés sont comparés à des sites forestiers voisins (témoins) qui font en partie de dispositifs de recherche (projets Guyaflux, Guyafor sur la forêt de Paracou proche de Sinnamary, UMR EcoFoG).

ACTION 1 : Mesures des flux de CO₂ échangés entre l'écosystème prairial et l'atmosphère

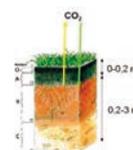
- La prairie puits ou source de C ?
- Comparaison avec la forêt d'origine



Des « tours à flux » permettent de mesurer en continu les flux de CO₂ échangés entre l'écosystème prairial et l'atmosphère et d'en calculer le bilan. Le projet propose une approche intégrée couplant les méthodes d'analyses de GES échangés en surface et celles portant sur les flux de C souterrain.

ACTION 2 : Mesures des changements de stock de C organique dans le sol

- Comment est stocké le C ?
- où et pour combien de temps ?



Les émissions des autres GES liés à l'élevage (CH₄ et N₂O) sont évaluées sur les mêmes parcelles pâturées afin de réaliser des bilans GES complets.

ACTION 3 : Mesures des autres GES (méthane CH₄, oxyde nitreux N₂O)

- bilan GES dans les systèmes herbagers :
- Quelles réductions par le stockage de C dans le sol ?



Collaborations et partenariats



cofinancé par l'UE et le CIRAD

Scientifiques

SELMET, BSEF



UREP, URZ



UMR ECOFOG



Scientifiques Régionaux

EMBRAPA
Amazônia Oriental
Université Fédérale du
Pará

Locaux

Bio Savane Sinnamary

ETVM Elevage Tourisme Vert Macouria

. Scebog, Paysans de Guyane

. Eleveurs

. Instituts Techniques (Ikare, Cetiom)

. Enseignement agricole

. UAG

Partenaires techniques principaux du projet

Echanges scientifiques permanents – appuis - formations

- UMR EcoFoG ECOlogie des FORêts de Guyane (projets GUYAFOR, GUYAFLUX, GUYASIM)
- INRA UREP Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial-INRA Clermont Ferrand
- URZ Unité de Recherche Zootechnique, Centre Inra de Guadeloupe
- BIO SAVANE coopérative d'élevage bovin viande en Agriculture Biologique (1 site d'étude dans l'exploitation d'élevage Bergère SCA) Elevage Tourisme Vert de Macouria (1 site d'étude en exploitation d'élevage)
- Lycée Agricole LPA, Guyane
- CIRAD UR SE Systèmes d'Elevage
- CIRAD UR B&SEF (missions d'appui)

Partenaires associés : Echanges scientifiques et appuis ponctuels

- UMR EcoFoG (projets QUALISOL)
- IKARE (l'Institut Karibéen et amazonien de l'élevage)
- CETIOM (Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains) - projet QUALISOL
- URAC, Unité de Recherche Agropédologique, Inra Guadeloupe

Partenaires régionaux associés : échanges scientifiques

- Le centre « EMBRAPA Amazônia Oriental » -Centre de recherche en Agriculture Belém (BRESIL) (R Pocard Chappuis Cirad, Marcia Grise, C de Carvalho EMBRAPA)
- Université Fédérale du Pará, Laboratoire de Recherches sur l'Agriculture Familiale (Livia Navigantes).
- IRD (U.R. SeqBio Séquestration du carbone et bio- fonctionnement des sols M Bernoux)

Projets associés, réseaux

- Action 1. Global Research Alliance, GRA, Groupe Elevage <http://www.globalresearchalliance.org/>)
- Action 2. Dispositif Amérique du sud Amazonie du Projet ANIMALCHANGE (AN Integration of Mitigation and Adaptation options for sustainable Livestock production under climate CHANGE)- Programme européen FP7 2010-2014.
- Project CNPQ /EMBRAPA Brésil Carbon Dynamics Study in soils under grassland in Areas Previously Occupied by Brazilian Amazonian Rainforest
- Action 3. projet ANR EPAD (Efficience Energétique et Environnementale et Productions Animales Durables, 2010-2014
- projet d'intégration au réseau ICOS Integrated Carbon Observation System) France / Europe. Cet observatoire est un réseau de stations de mesure des concentrations atmosphériques et des flux échangés par les écosystèmes.

CARPAGG

CARBONE des Pâturages de Guyane et Gaz à effet de serre

Un outil d'accompagnement du développement de l'élevage dans le cadre de l'adaptation de l'agriculture au Changement Global

Un projet scientifique original sur le rôle et les enjeux des écosystèmes tropicaux pâturés dans le réchauffement climatique

Pour concilier services environnementaux et production fourragère.

LE CONTEXTE

Concernant l'élevage de ruminants, il s'agit en particulier de contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique :

- en diminuant les émissions des 3 principaux gaz à effet de serre : gaz carbonique CO₂, méthane CH₄ et protoxyde d'azote N₂O,
- en stockant du Carbone (C) dans le sol. Des mécanismes de paiement et de subvention sont susceptibles de rétribuer ces services.

Les systèmes herbagers de Guyane remplissent des fonctions productives et environnementales que le projet CARPAGG se propose d'étudier dans le cadre des enjeux actuels de l'agriculture dans le monde : nourrir les hommes tout en protégeant l'environnement.

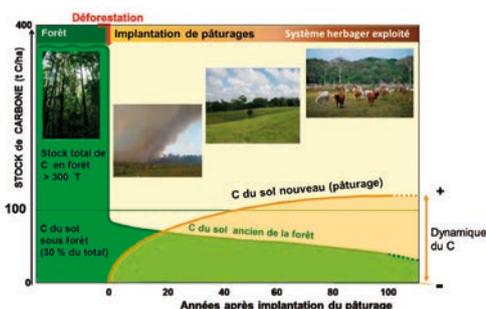
Comment gérer de façon durable le changement d'utilisation des terres après transformation de la forêt amazonienne en pâturage ?

Systèmes d'élevage de ruminant = 40% SAU (22 000 ha) = 0.1 % du territoire (Forêt = 90%)

Accroissement des surfaces en herbe lié à l'objectif d'augmentation de la production de viande.

Peut-on stocker du Carbone dans les prairies issues de déforestation et contribuer au développement de systèmes herbagés productifs ?

LES HYPOTHESES ET OBJECTIFS



CARPAGG répond à ces enjeux en Guyane où les pâturages se mettent en place notamment au détriment des écosystèmes forestiers qui contiennent plus de C par unité de surface que tout autre mode d'utilisation du sol (200 à 400 t C/ha).

Au-delà de l'effet indéniable du changement du mode d'occupation des sols sur les pertes de carbone, le projet cherche à comprendre comment les pâturages issus de déforestation peuvent continuer à stocker du C dans le sol, tout en fournissant une production fourragère forte.

Etablir des indicateurs de références adaptés aux zones tropicales humides (Guyane française) vers des systèmes herbagés productifs et certifiés.

COMMENT MESURE-T-ON LE CARBONE ?

La prairie puits ou source de carbone ?

Mesure en continu des flux de C entre l'écosystème prairial et l'atmosphère avec un anémomètre sonique et un analyseur de gaz.

Comparaison avec la forêt d'origine.

Comment évolue le C dans le sol ?

Mesure du stock de carbone dans le sol sur 1 mètre de profondeur avec une carotteuse.

Quel bilan GES dans les systèmes herbagers guyanais : émission GES- stockage C ?

Mesure des émissions de méthane (CH₄) et d'oxyde nitreux (N₂O).

LES PERSPECTIVES POUR LA GUYANE

- Etablissement de références locales sur stockage de carbone (C) et émissions gaz à effet de serre (GES) dans les systèmes herbagers. Mise au point d'indicateurs carbone, méthane (CH₄) et oxyde nitreux (N₂O), bilan C / GES.
- Contribution à la définition de modes d'utilisation durables des surfaces déforestées et converties en prairies.
- Formation auprès des structures d'enseignement et d'appui au développement.
- Appui au développement de l'élevage :
 - * contribution à la mise au point d'indicateurs d'évaluation en vue des mesures de réduction de GES en agriculture
 - * Indicateurs de fertilité des sols des pâturages, pérenniser des prairies productives capables d'accompagner le développement des productions bovines.
- Mise en place d'un observatoire du C en Guyane. Pérennisation, renforcement du dispositif de recherches Inra Cirad Antilles Guyane, coopération régionale Amazonie.

Retrouvez le projet CARPAGG sur <http://antilles-guyane.cirad.fr>

Contact : vincent.blanfort@cirad.fr UMR SELMET



Changement climatique et gaz à effet de serre en agriculture

PICON-COCHARD C¹ & SOUSSANA J.F.²

¹INRA, UREP, 5 chemin de Beaulieu, 63100 Clermont-Ferrand

²INRA, DS Environnement, 147 rue de l'Université, 75007 Paris

Introduction

Le changement climatique correspond à une augmentation dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (GES : dioxyde de carbone, vapeur d'eau, méthane, protoxyde d'azote) qui sont les acteurs principaux du réchauffement de l'air (IPCC, 2007). A l'échelle du globe et depuis le début de l'ère préindustrielle, la concentration en CO₂ dans l'atmosphère a augmenté de 100 ppm et le réchauffement de l'air a été de 0,6°C, avec une accélération depuis les années 1990. De plus, ce changement climatique moyen s'accompagne d'une augmentation de la variabilité du climat avec l'apparition plus fréquente d'événements dits extrêmes, car non ou peu référencés dans les bases de données météorologiques.

1. Scénarios d'évolution du climat et des GES

La distribution géographique du changement de température à l'échelle du globe est assez bien connue, avec les effets les plus marqués aux hautes latitudes. En revanche, il y a une grande incertitude concernant les régimes de précipitations qui sont affectés à une échelle régionale, voire locale, par la topographie, la présence de mers, lacs ou forêts lesquels ont des effets directs très localisés sur le régime de précipitations des petites régions (IPCC 2007).

Différents types de scénarios socio-économiques ont été développés par le GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) afin de prendre en compte les effets des activités humaines dans l'évolution du réchauffement de l'air et des émissions de GES.

Selon le type d'économie et l'utilisation des combustibles d'origine fossiles, le réchauffement de l'air serait modéré (0.5-1.5°C) dans un futur proche (2020-2029) ; par contre dans un futur lointain (2090-2099), la fourchette serait beaucoup large (0.3-5°C) (Fig. 1a) ; la concentration en CO₂ serait comprise entre 500 et environ 900 ppm à la fin du siècle (Fig. 1b), soit plus de 100 ppm qu'à l'heure actuelle.

2. Gaz à effet de serre et secteur agricole

Entre 1970 et 2004, les rejets annuels de CO₂, le principal GES d'origine anthropique, sont passés de 21 à 38 gigatonnes (Gt), soit une progression d'environ 80%, et représentaient 77% des émissions totales de GES d'origine anthropique en 2004 (Fig. 2). Le secteur agricole incluant la foresterie a contribué à environ 30% des émissions des GES. Les sols agricoles et la fermentation entérique des ruminants contribuent pour environ 30% chacun des émissions agricoles mondiales.

Le protoxyde d'azote (N₂O) est produit par les sols suite aux processus de nitrification et dénitrification liés en grande partie aux apports d'engrais, fumier, lisier. Le méthane (CH₄) est produit lors de la fermentation entérique des ruminants et par les déjections animales. Ces deux gaz, bien que présents dans l'atmosphère sous forme de trace, ont respectivement un pouvoir de réchauffement 310 et 23 fois plus élevé que le CO₂.

3. Rôle des écosystèmes terrestres dans l'atténuation du réchauffement atmosphérique

Les écosystèmes terrestres sont capables de fixer le CO₂ lors du processus de photosynthèse pour produire de la biomasse et la matière organique du sol. Grâce à cette fixation active, les écosystèmes terrestres peuvent atténuer les émissions de GES liées aux activités humaines, on dit qu'ils sont des puits de carbone.

A l'échelle mondiale, environ la moitié des émissions de GES liées aux activités humaines serait capturée par les écosystèmes et les océans (Robert & Saugier 2003). Mais, dans le cas des prairies, ils constituent aussi une source de méthane émis notamment par les ruminants domestiques et d'oxyde nitreux produit par les sols agricoles et les effluents d'élevage.

Le cas des cultures, forêts et prairies

Une étude menée en Europe a permis de comparer les émissions de GES d'un grand nombre de cultures, forêts et prairies réparties sur 25 pays (Schulze et al. 2009).

Les données obtenues sont issues de la combinaison de mesures atmosphériques par des méthodes continues ou discontinues et des analyses de sol, menées sur plus de 50 sites. Ce travail a permis de montrer que les trois écosystèmes ont eu une production primaire élevée (net primary productivity : valeurs négatives). Par contre les prélèvements de biomasse dans les cultures et les prairies conduisent à un flux nul au contraire des forêts (Fig. 3).

Le bilan de GES a ensuite été réalisé en prenant en compte l'ensemble des flux sortants des écosystèmes (respiration, CH₄, N₂O). A cause de la rotation des cultures, le bilan des GES est positif ce qui correspond à une émission nette de GES vers l'atmosphère. Pour les forêts et les prairies, le bilan est négatif correspondant à une fixation nette des GES.

Ces résultats confirment ceux obtenus pour 10 sites de prairies européennes (Soussana et al. 2007). De plus ce dernier travail a montré que les pratiques de gestion peuvent inverser la tendance source vers puits et vice versa. Des pratiques de gestion extensive permettraient d'augmenter la fixation des GES.

4. Eléments d'actualisation du dernier rapport du GIEC 2013 (IPCC 2013)

Le premier volume (The Physical Science Basis) du 5ème Rapport d'évaluation du GIEC est paru fin septembre 2013. Les conclusions principales sont résumées ci-dessous.

L'évolution récente du climat est liée à trois facteurs :

- la réponse du climat aux facteurs naturels (activité solaire, activité volcanique),
- la variabilité interne au climat (interactions océan-atmosphère),
- la réponse du climat aux perturbations dues aux activités humaines. (CO₂ : +20% depuis 1958, + 40 % depuis 1750)

Les changements climatiques à venir :

- au rythme d'émissions actuel, l'augmentation des températures sera de 4°C à la fin du siècle
- le scénario le plus favorable de + 2°C par rapport à l'ère préindustrielle est envisageable si :
 - la croissance des émissions d'ici à 2020 est stoppée
 - les émissions deviennent négatives à la fin du XXI^{ème} siècle (captage et stockage du CO₂).

Conclusion principale pour les zones tropicales et subtropicales :

- **Augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de précipitations extrêmes** sur la majeure partie des terres émergées aux latitudes moyennes et sur les régions tropicales humides
- **Précipitations**
Diminutions aux latitudes moyennes et régions subtropicales sèches. Augmentation dans les régions humides des latitudes moyennes
- **Températures**
Plus de variabilité, plus forte augmentation à court terme des moyennes saisonnières et des températures moyennes annuelles

Discussion, Conclusion

Le climat change et risque de changer de façon plus importante si les émissions de GES ne sont pas réduites. La distribution géographique du changement de température est assez bien connue mais ceci n'est pas le cas pour les précipitations.

Le secteur agricole est émetteur de GES, tandis que les écosystèmes et les océans peuvent être puits de C. Dans ces conditions, il est primordial de bien gérer et adapter les forêts et les prairies pour maintenir leur activité puits de C. Il s'agira alors d'aller vers une agriculture multifonctionnelle avec des territoires aménagés pour une meilleure gestion de l'eau, des sols et ainsi limiter la contribution du secteur agricole aux émissions de gaz à effet de serre.

Remerciements

Les auteurs remercient le projet CARPAGG (CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre), cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER PO 2007-2013) et le Cirad.

Références

IPCC. 2007. Climate change. 2007. The physical science basis. In: Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z et al.). Cambridge University Press, Cambridge and New York, NY.

IPCC 2013. Fifth Assessment Report (AR5). Acceptance of the Actions taken at the Twelfth Session of Working Group I - Working Group I: contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), Climate Change 2013: The Physical Science Basis - Approved Summary for Policymakers.

Robert M, Saugier B. 2003. Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *Comptes Rendus Geosciences*, 335, p. 577-595.

Schulze E., Luyssaert S, Ciais P, Freibauer A, Janssens I, Soussana JF, Smith P, Grace J, Levin I, Thiruchittampalam B, Heimann M, Dolman A, Valentini R, Bousquet P, Peylin P, Peters W, Rödenbeck C, Etiope G, Vuichard, N, Wattenbach M, Nabuurs G, Poussi Z, Nieschulze J, Gash, J, & Team C. 2009. Importance of methane and nitrous oxide for europe's terrestrial greenhouse-gas balance. *Nature Geoscience*, 2, p. 842-850.

Soussana J.F, Allard V, Pilegaard K, Ambus C, Campbell C, Ceschia E, Clifton-Brown J, Czobel, S, Domingues R, Flechard C, Fuhrer J, Hensen A, Horvath L, Jones M, Kasper G, Martin C, Nagy Z, Neftel A, Raschi A, Baronti S, Rees R.M, Skiba U, Stefani P, Manca G, Sutton M, Tuba Z, & Valentini, R. 2007. Full accounting of the greenhouse gas (CO₂, N₂O, CH₄) budget of nine European grassland sites Agriculture, Ecosystems and Environment, 121, p. 121-134.

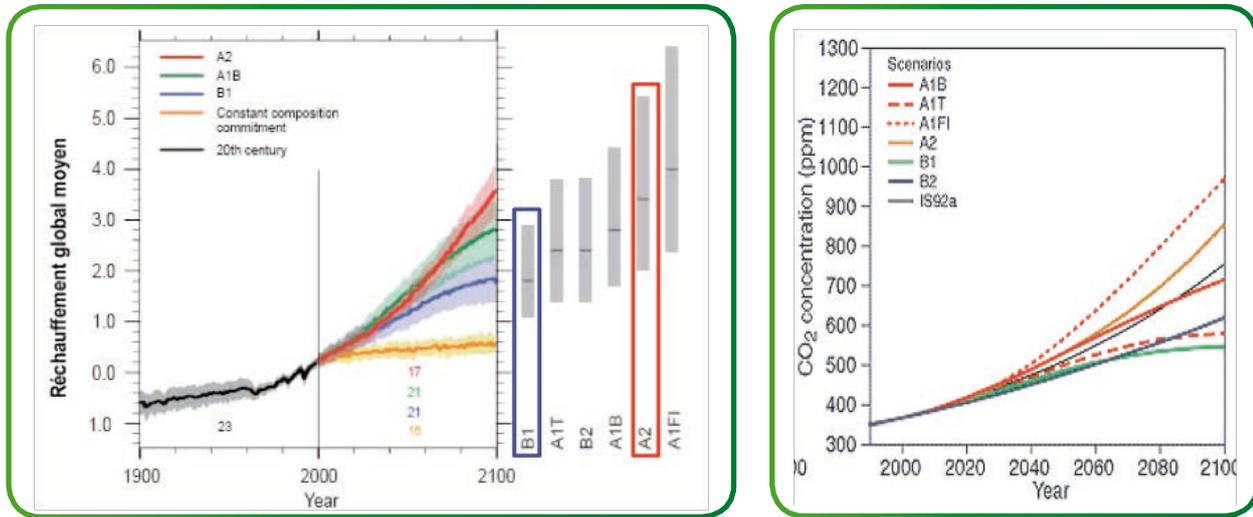


Figure 1. Evolution du réchauffement moyen global (a) et concentration en CO₂ (b), mesurées (noir) au 20^{ème} siècle et simulées pour le 21^{ème} siècle selon divers scénarios socio-économiques (couleurs) (IPCC 2007).

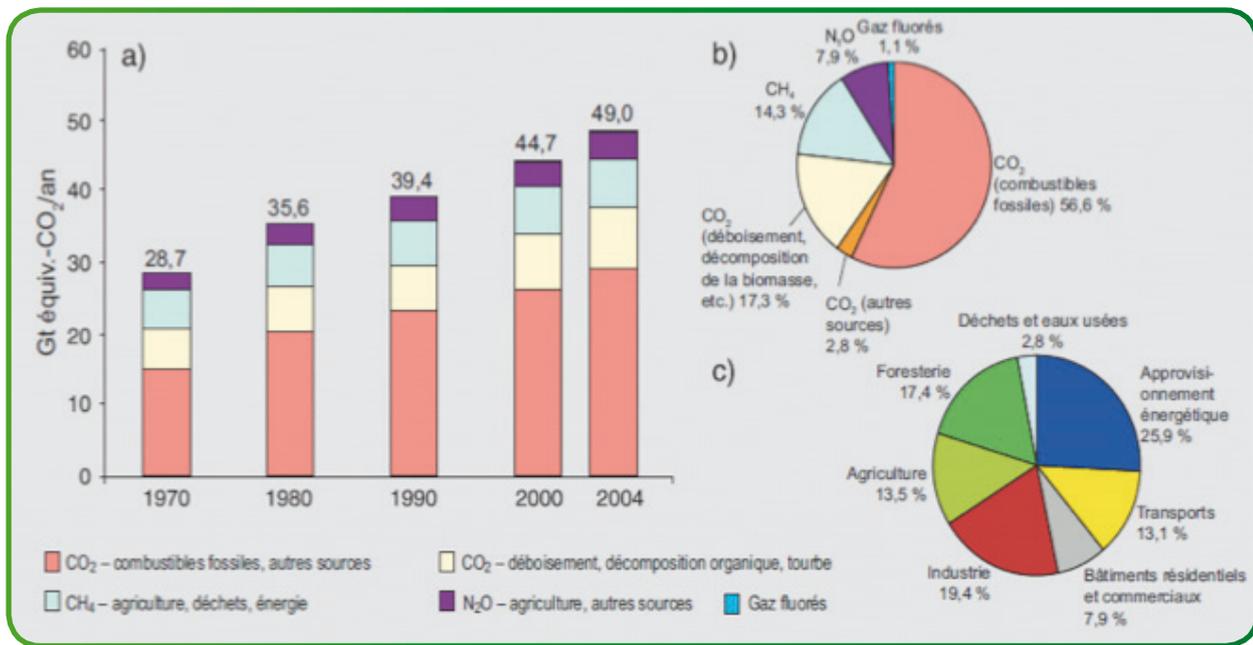


Figure 2. (a) Emissions annuelles mondiales de gaz à effet de serre d'origine anthropique entre 1970 et 2004, (b) contribution des différents gaz dans les émissions, (c) répartition des émissions par secteur d'activité (IPCC 2007).

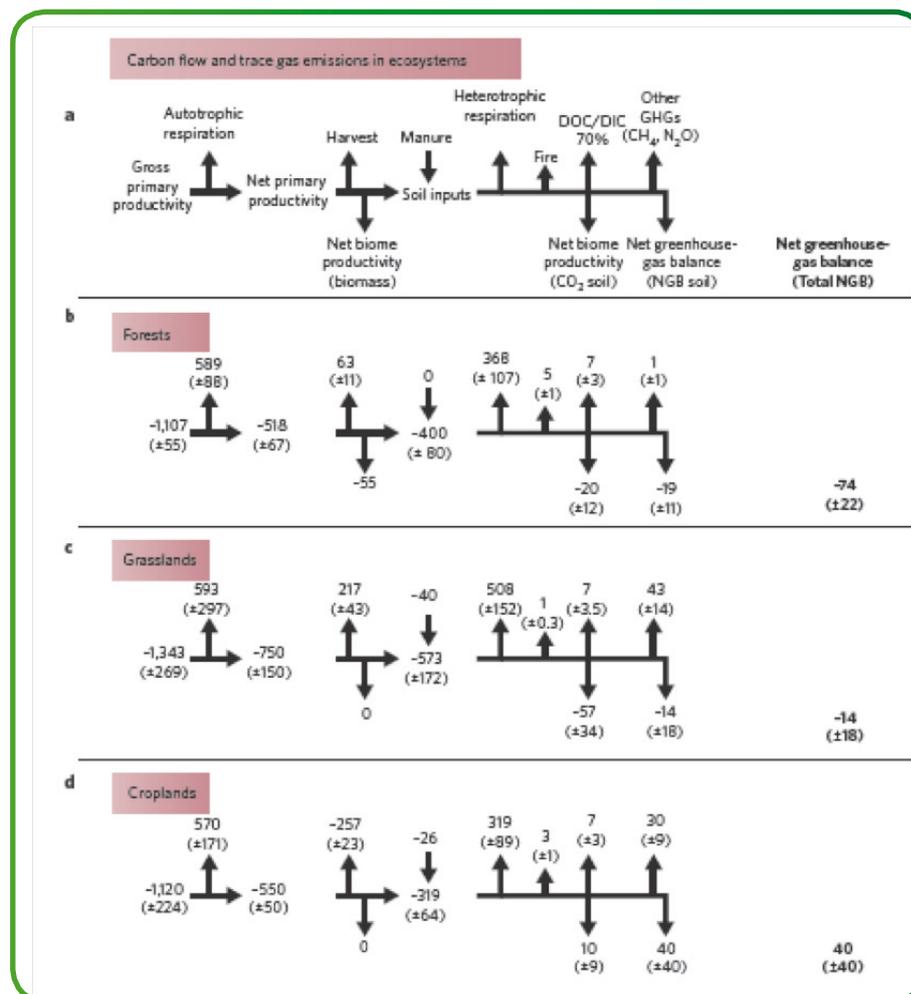


Figure 3. Flux de carbone et GES pour différents écosystèmes (b : forêts, c : prairies, d : cultures) situés en Europe (EU-25). Des valeurs positives correspondent à une émission (source) et des valeurs négatives correspondent à une fixation (puits) (Schulze et al. 2009).

Elevage, gaz à effet de serre et changements d'utilisation du territoire

LECOMTE Ph.¹ & BLANFORT V.^{1,2}

¹ CIRAD UMR SELMET, Campus international de Baillarguet - TA C-18, 34398 Montpellier Cedex 5, France

² CIRAD UMR SELMET, BP 701, 97387 Kourou Cedex, Guyane française

Le contexte de l'élevage dans les grands enjeux actuels

Dans la géographie mondiale de la production alimentaire, le secteur de l'élevage s'inscrit depuis plusieurs décennies dans une dynamique de changements considérables ; pour bon nombre, ils sont le résultat de facteurs exogènes.

L'accroissement de la population planétaire et d'autres paramètres démographiques tels que la répartition des âges et l'urbanisation forte des populations, font évoluer les natures et les quantités de la demande alimentaire. De même la croissance économique et la progression des revenus individuels dans de nombreux pays émergents contribuent de manière prépondérante à l'augmentation de la demande en produits animaux.

La croissance attendue des productions, si elle impactera bien les grands pays producteurs actuels, elle se déploiera toutefois essentiellement dans les pays du Sud. L'élevage fournit un apport alimentaire en pleine croissance dans les pays en voie de développement (PED) et émergents où s'est réalisé entre 1980 et 2000 l'essentiel des augmentations des productions de viande (triplement), de lait (doublement) et de leur consommation. Les estimations de la FAO pour 2050 prévoient à nouveau un doublement de ces quantités, essentiellement dans les pays du Sud.

Attachés à cette perspective de croissance, de nombreux rapports (Millennium Ecosystem Assessment 2005, Steinfeld et al. 2006) ont récemment mis en débat la complexité des relations au milieu, directement ou indirectement liées à l'ensemble des activités du secteur (émissions de GES et contribution au changement climatique, charges en N et P, érosion des sols, de la biodiversité, dégradation quantitative et qualitative des pâturages, compétition sur les matières à destination de l'alimentation humaine, etc.).

Quel que soit le lieu des productions, les effets qu'entraîneraient le maintien ou la poursuite d'une croissance en absence d'évolution dans les critères d'évaluation et dans les pratiques de production, sont maintenant largement intégrés par la société et par tous les acteurs des filières animales.

1. Le poids de l'élevage dans l'écosystème global

Toutes catégories confondues, la planète compte 23 milliards d'animaux d'élevage dont 70 % sont détenus par des éleveurs hors OCDE. L'élevage mobilise près de 4 milliards d'ha de surfaces en herbe, dont 3.4 sont dévolus au pâturage par les animaux. Il fournit le tiers des protéines pour l'alimentation humaine et représente 40 % de la valeur de la production agricole brute mondiale. Enfin, il contribue aux moyens de vie d'un milliard de personnes vulnérables.

Dans l'ensemble du secteur, on observe de grandes tendances quant à l'utilisation des espaces. Elles portent sur la relocalisation des ressources, des effectifs d'animaux, sur l'intensification, l'intégration, la financiarisation du secteur, la concentration des productions et l'importance grandissante du transport dans les grands flux internationaux d'échanges.

Dans la poursuite d'un objectif de développement durable, au vu de la très large diversité des effets induits, et des multiples spécificités des systèmes d'élevage mis en œuvre que ce soit en France ou de par le monde, ceux-ci sont l'objet d'enjeux et de questions sur les changements, les adaptations possibles et sur l'atténuation des impacts. L'élevage est en effet à l'origine de profonds changements des espaces terrestres. Il concerne des surfaces considérables, dépassant celles de l'agriculture proprement dite (un tiers des terres cultivées mondiales est consacré à

la production d'aliments pour le bétail). Plus ou moins stabilisés en régions tempérées, ces changements s'accroissent dans le monde tropical depuis la fin des années 1970, soit par l'extension et l'évolution rapide des zones vouées à l'élevage, soit par une pression accrue sur les ressources naturelles.

Les répercussions de l'élevage se traduisent également à l'échelle globale de la biosphère à travers les changements climatiques. Le secteur de l'élevage (Fig. 1, Fig. 2) contribue globalement à 14,5% des émissions GES anthropiques (FAO 2013) et participe ainsi nettement au réchauffement climatique. Au-delà des constats actuels, la perspective largement étayée du changement climatique, questionne tout autant les modalités d'adaptation de l'élevage en de nombreux endroits de la planète.

2. Une grande diversité de voies de progrès

A la vision d'efficacité classique qui présidait à l'atteinte d'objectifs maximisant la performance productive, on voit se substituer de plus en plus la notion d'efficacité dans la mobilisation des ressources: naturelles, humaines, informationnelles, matérielles, financières, territoriales.

L'efficacité avec laquelle ces différentes ressources sont et seront utilisées pour continuer à produire des biens et pour assurer les multiples fonctions et services que l'on attend de l'élevage, concerne tous les systèmes (Fig. 3).

Pour permettre de ralentir la dégradation des ressources sur lesquelles reposent les productions animales, tout en maintenant des performances élevées, l'adaptation des systèmes devra de plus en plus être conçue et évaluée en lien étroit avec la quantité de ressources naturelles mobilisées ou de pollutions émises par unité de produit ou de surfaces. Il s'agira également d'intégrer la compréhension et la prise en compte de la valeur des services et dys-services écosystémiques¹ dans les coûts et revenus de production.

De plus en plus, on évoque également les termes d'éco efficacité ou d'efficacité durable pour adresser ainsi la nécessité d'être efficace sur de multiples critères. Pour les systèmes extensifs par exemple au-delà de la production de biens, la fourniture de services environnementaux tels que la séquestration du carbone et la protection de la biodiversité sont un exemple vis-à-vis duquel le territoire national et en particulier local a de grands atouts.

3. Controverse élevage & CC

Dans un tel contexte, le défi est bien de trouver des solutions qui soient innovantes et adaptées à la diversité des filières et des contextes territoriaux.

La taille et la complexité de la tâche a conduit à reconnaître la nécessité d'actions concertées entre tous les acteurs et parties prenantes qu'ils relèvent du secteur public ou privé, du milieu des producteurs ou de la société civile, des milieux de recherche et du développement, à l'échelle internationale, des plateformes telles que « Livestock Dialogue » animée par la FAO, se fixent ainsi comme objectif de promouvoir les voies d'une meilleure compatibilité entre les différentes catégories de performances (techniques, économiques, environnementales, sociales et sociétales) des systèmes de production.

Il s'agira entre autres de resituer les valeurs auxquelles peuvent contribuer les pâturages, les surfaces utilisées sont les plus larges et représentent ainsi un potentiel de stockage C et d'atténuation GES reconnu et clairement affirmé (FAO 2013).

Conclusion

Les pressions de l'élevage sur l'environnement en augmentation depuis quelques décennies et plus récemment la prise en compte de services écologiques, renouvellent les questions de recherche et de développement en élevage. Quels schémas seront capables de concilier l'amélioration des performances environnementales avec la mise en place de systèmes d'élevage assurant la réponse aux besoins alimentaires des populations et une durabilité économique et sociale ?

Un important chantier est notamment à concevoir pour établir les référentiels, le monitoring, l'équité dans la rétribution aux acteurs des « services carbone » que peuvent rendre l'élevage et les prairies. Autant de challenges pour la recherche dans les pays du sud et dans certaines Régions françaises d'outre-mer comme la Guyane de part son positionnement en Amazonie.

La Guyane au travers de grands projets² (EPAD, AnimalChange, CARPAGG Blanfort et al. 2013, Stahl et al. 2013) et la mise en place de l'Observatoire du Carbone (Sirder & Oulliac 2013) est au cœur des grandes questions autour des enjeux Forêt tropicale – Elevage. Son positionnement en situation réelle permet de produire des références actualisées, d'évaluer les stratégies d'atténuation, d'adaptation au changement, d'accroître la résilience des systèmes, et de contribuer à la mise en œuvre de politiques locales, régionales qui soient effectives.

¹ *Un service écosystémique est un avantage retiré par un individu ou une société d'une (ou de) fonction(s) et valeur(s) attribuée(s) à un écosystème. Ce concept combine les fonctions écologiques et les usages qui en sont fait. Il peut donner lieu à des évaluations monétaires.*

Un dys-service est une fonction jugée comme pénalisante

² *EPAD Projet ANR 2010-2014 (Efficience Energétique et Environnementale et Productions Animales Durables, ANIMALCHANGE (AN Integration of Mitigation and Adaptation options for sustainable Livestock production under climate CHANGE)- Programme européen FP7 2010-2014.*

CARPAGG (CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre), cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER PO 2007-2013) et le Cirad.

Références

Blanfort V, Ponchant L, Dézécache C, Stahl C, Freycon V, Picon-Cochard C, Blanc L & Fontaine S. 2013. Dynamique du carbone dans les sols de prairies issues de la déforestation de la forêt guyanaise. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 3, 4 p.

FAO. 2013. Tackling climate change through livestock - A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Gerber P, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, Falcucci A, and Tempio G. FAO, Rome.

Sirder H, & Oulliac B. 2013. Vers un observatoire guyanais en du carbone et des gaz à effet de serre (GES). In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 1, 4 p.

Millennium Ecosystem Assessment (MEA). 2005. Current state and trends assessment, Washington D.C., Island Press.

Stahl C, Klumpp K, Falcimagne R, Picon-Cochard C, & BLANFORT V 2013. Flux de C échangés entre l'écosystème prairial et l'atmosphère en Amazonie française. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies

issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 2. 4 p. (Projet CARPAGG).

Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, & De Haan C. 2006. Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options. Rome, FAO, 390 p. Steinfeld H., Mooney H.A., Schneider F., & Neville L.E., eds.

Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel.

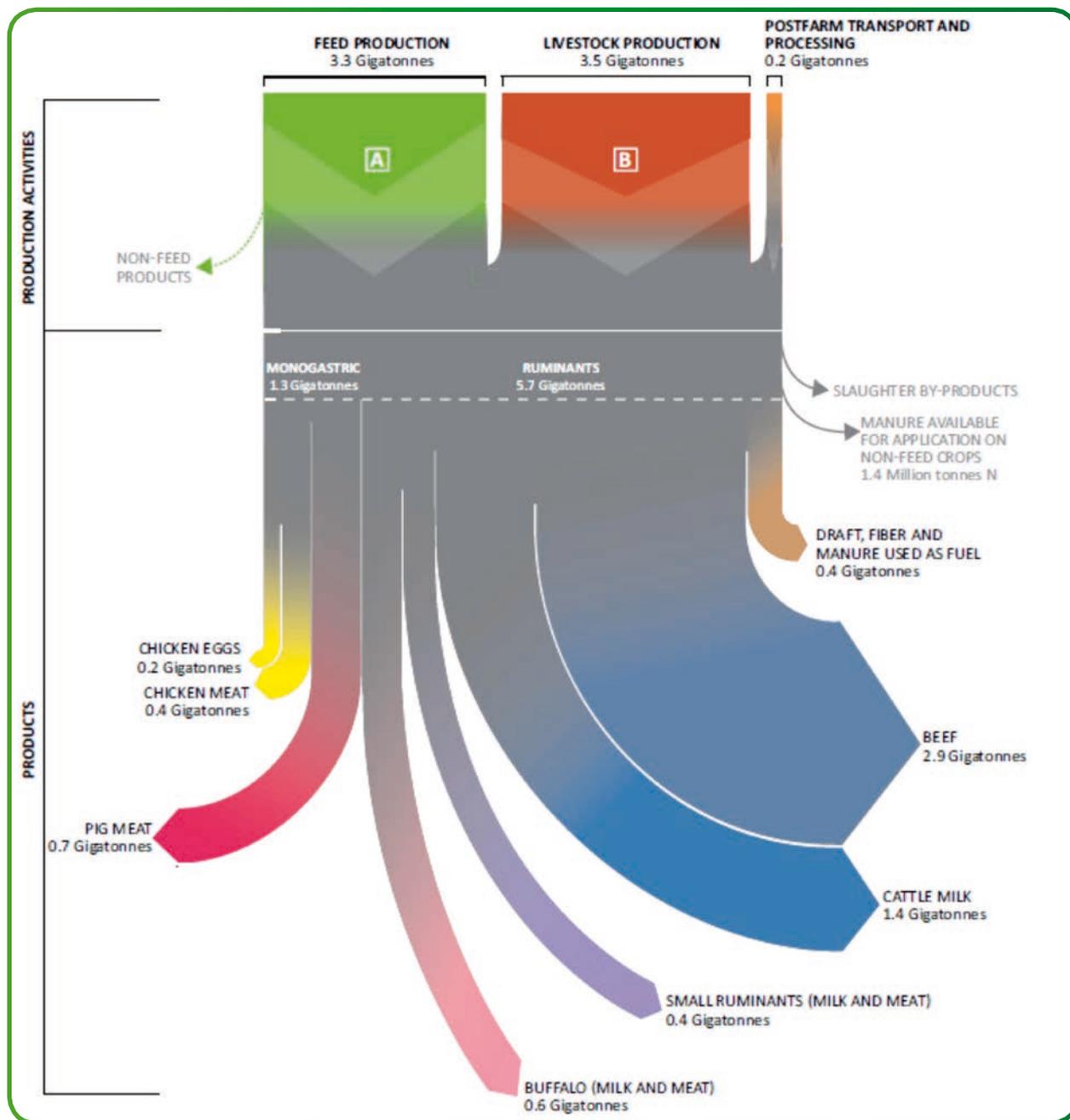


Figure 1. Contribution détaillée de l'ensemble du secteur productions animales à l'émission de gaz à effet de serre telle que calculée sur l'ensemble du cycle des produits (FAO, 2013).

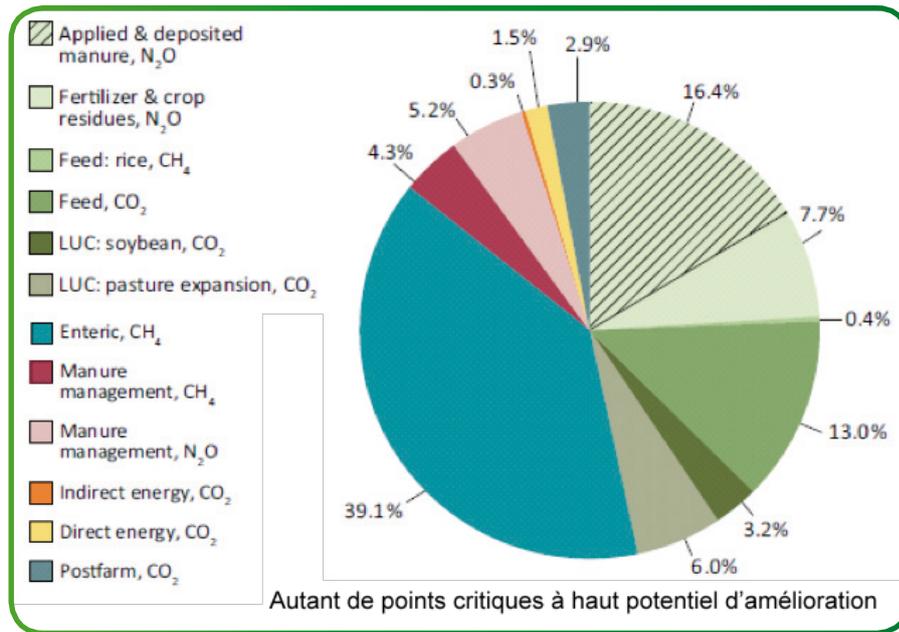


Figure 2. Répartition globale des sources d'émission de gaz à effets de serre attribuée au secteur des productions animales (FAO, 2013).

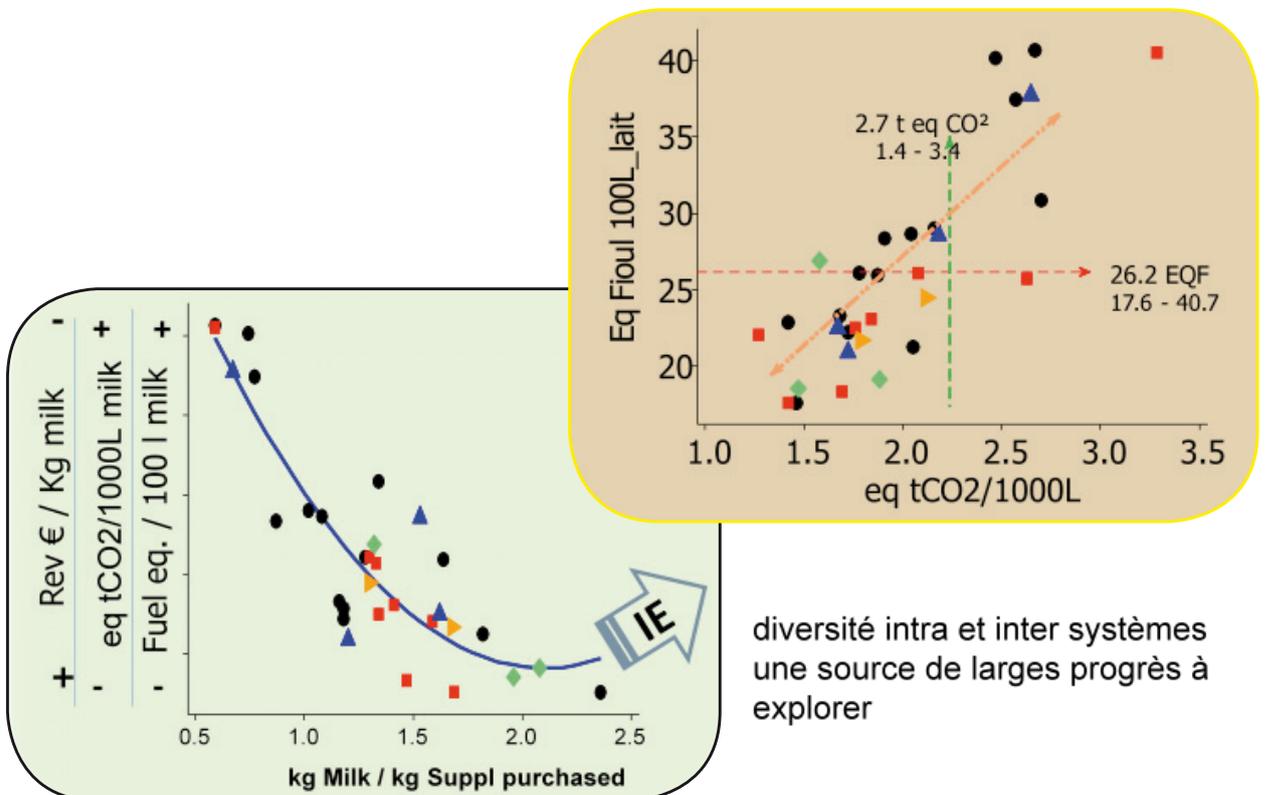


Figure 3. Diversité d'efficacités et enjeux liés à l'intensification écologique de l'élevage (Source : ANR EPAD 2010-2015).

SESSION 2.

Les flux de CO_2 :

comment se réalise le stockage de carbone (C) dans les écosystèmes forestiers et prairiaux ?

Quels sont les processus d'entrée du C ?

Le stockage du carbone d'un écosystème est effectué par le bilan des entrées et des sorties de l'écosystème. Les flux nets de CO₂ entre un écosystème et l'atmosphère sont mesurés en continu à l'aide de capteurs couplés positionnés sur un mat au-dessus du couvert végétal appelé « tour à flux » (la méthode des fluctuations turbulentes).



Vue de la tour à flux du dispositif forestier Guyaflux installé à Paracou depuis 2003 (Photo : D Bonal).



En 2010, dans le cadre du projet CARAPGG, deux dispositifs de mesures de flux de CO₂ (tours à flux) ont été installées dans deux prairies pâturées dans des élevages bovins à Risquetout (Macouria) et à Sinnamary (à proximité de Guyaflux). (Photo : V Blanfort).

Quelques éléments de théorie sur la mesure des flux de C et de gaz à effet de serre dans les écosystèmes

FALCIMAGNE R

Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial, 5 Chemin de Beaulieu, 63039 Clermont – Ferrand Cedex 2

Introduction

Les écosystèmes naturels et agricoles sont des sources et des puits de gaz à effet de serre. Trois gaz à effet de serre principaux interviennent dans les échanges avec l'atmosphère: le dioxyde de carbone CO₂ (échangé avec les animaux, le sol et la végétation), l'oxyde nitreux N₂O (émis par le sol), CH₄ (émis par les ruminants au pâturage).

Le stockage du carbone (C) d'un écosystème est effectué par le bilan des entrées et des sorties au niveau de cet écosystème. On parle alors de «Net Ecosystem Exchange» (N.E.E.). Le N.E.E. est constitué pour les entrées de la photosynthèse, la fertilisation organique, les déjections animales et la rhizodéposition et pour les sorties de la respiration de l'ensemble sol – racines, de la respiration des parties aériennes et de la respiration des animaux.

Produit de la rumination, le CH₄ est principalement émis lors de la fermentation entérique des ruminants. Il s'agit d'une dégradation en anaérobiose de la biomasse végétale. Elle est le résultat d'une fermentation des molécules glucidiques engendrée par l'activité de micro-organismes anaérobies stricts. Le système digestif des ruminants ne permet pas la transformation complète des substrats. Ceci conduit à une fermentation incomplète qui engendre une production de CH₄, principalement émis par éructation.

Les émissions de N₂O proviennent de l'activité des micro-organismes du sol, plus particulièrement aux processus de dénitrification et de nitrification (Webster, et al. 1999) qui dans les sols cultivés sont fortement liés à l'utilisation d'engrais azotés minéraux, à la présence de légumineuses et à la gestion des déjections animales pour les surfaces prairiales pâturées.

L'amplitude de ces flux dépend de nombreux facteurs liés au climat, au sol, à la végétation, à la gestion, ou à l'environnement global. L'objectif de cet article est de présenter rapidement les méthodes de mesures de ces flux.

1. La mesure des flux de CO₂ entre l'écosystème et l'atmosphère par la méthode des fluctuations turbulentes (ou Eddy Correlation)

1.1.Principe

La mesure des flux de CO₂ par la méthode des corrélations turbulentes («Eddy covariance», ou «Eddy correlation») permet de calculer les bilans d'échange de CO₂ à l'échelle de la parcelle. Cette technique, qui est basée sur la mesure des transferts de masse par turbulence, est une technique intégrative qui prend en compte tous les processus et peut s'appliquer sur des surfaces importantes (jusqu'à 50 – 100 ha).

Les mesures sont effectuées à une fréquence de 10 Hz et enregistrées à des pas de temps de trente minutes.

Il a été montré (Kaimal J.C. and Finigan J.J.) que le flux pouvait se calculer à partir du produit de la vitesse verticale du vent (w) et de la concentration en CO₂ (C) de la turbulence. On arrive donc à une densité de flux instantanée F qui est égale à $C^* w$.

1.2. Les appareils de mesure

Les flux de gaz carbonique sont mesurés en continu à l'aide de capteurs couplés positionnées sur un mat au-dessus du couvert végétal couramment appelé «tour à flux». Un anémomètre sonique 3D enregistre la vitesse du déplacement de l'air dans les 3 dimensions. Il est associé à un analyseur de gaz infrarouge qui mesurent la concentration de l'air en CO₂. L'ensemble permet de calculer les quantités de CO₂ échangés entre la prairie et l'atmosphère sur une période donnée.

L'acquisition des données se fait via un boîtier d'entrées analogiques de l'anémomètre ce qui assure une parfaite synchronisation entre les données de CO₂ et celles de vent. Le décalage éventuel entre le signal vent et le signal CO₂ est corrigé par calcul en fonction des caractéristiques dimensionnelles du tube de prélèvement et du débit de circulation de l'air dans celui-ci.

1.3. Les mesures associées

La technique utilisée pour la mesure des flux présente des limites liées à la technologie des capteurs, notamment en cas de fortes précipitations qui perturbent la transmission des ultrasons entre les branches de l'anémomètre sonique. Dans ce cas, les données issues de l'appareil ne sont pas utilisables et il est nécessaire de faire appel à des techniques dites de «gap filling» pour les remplacer. Pour cela, il est nécessaire d'avoir, sur chaque site instrumenté, des mesures météo classiques qui seront utilisées pour compléter les données de flux manquantes.

1.4. Notion d'empreinte de mesure ou «footprint»

L'emplacement du mât de mesure dans la parcelle est choisi de manière à prendre en compte les flux placés sous le vent dominant. Il est donc important d'avoir une connaissance précise de la rose des vents du site.

Une étude de la zone d'empreinte (footprint, Fig.1) mesurée est également réalisée en fonction de critères tels que la hauteur du mât, la vitesse et la direction du vent majoritaire (sur le plan horizontal) ainsi que la rugosité du couvert.

Cette étude, effectuée à partir de modèles mathématiques existants (Kormann et Meixner), permet de vérifier que les flux pris en compte sont bien ceux issus de la parcelle instrumentée. Une estimation rapide permet de donner une portée de mesure qui peut s'étendre entre trente et cent fois la hauteur du mât.

1.5. Les résultats obtenus à partir des mesures de flux de CO₂ Mesures instantanées

Les mesures effectuées à la fréquence de 10 Hz sont visualisées (Fig.2) en temps réel sur l'ordinateur d'acquisition des données. Elles ne sont pas utilisables en tant que tel et nécessitent l'utilisation d'un logiciel de calcul (EdiRe) pour obtenir des valeurs sur des pas de temps qui sont au minimum à l'échelle de la journée.

Echelle journalière

Les traitements permettent d'obtenir une vision des flux à l'échelle d'une ou plusieurs journées (Fig. 3). Par convention, les flux négatifs sont considérés comme stockage et les flux positifs comme émission de l'écosystème vers l'atmosphère.

Bilan annuel – Notion de «gapfilling»

Sur de courtes périodes il se peut que les données soient absentes (en cas de dysfonctionnement des équipements de mesure par exemple) ou erronées en cas de fortes précipitations qui perturbent le signal fourni par l'anémomètre sonique. Il est alors nécessaire de compléter le jeu de données existantes par des données «simulées». L'obtention de ces données manquantes est réalisée par une technique dite de «gap filling». Il en existe de nombreuses, celle la plus couramment utilisée est basée sur la reprise de données mesurées sur une période voisine et dans des conditions météorologiques identiques.

La figure 4 montre un exemple de résultats particulièrement affectés par ces problèmes. Les données manquantes sont en blanc.

La figure 5 montre les mêmes données après gap filling. Le bilan annuel peut alors être réalisé.

2. La mesure des flux d'oxyde nitreux (N₂O)

Chambres automatiques :

Cette technique de mesure en continu sur des emplacements équipés d'embases faisant le lien avec le sol nécessite un pâturage rotatif. Les chambres sont placées sur les placettes pâturées immédiatement après le passage des animaux (Fig. 6). Les mesures par accumulation sont réalisées de manière automatique successivement sur chaque chambre pendant une durée de trente minutes.

Chambres statiques :

Les mesures par chambres statiques peuvent être effectuées pendant le pâturage des animaux mais nécessitent la présence d'un opérateur qui se déplace avec une enceinte close et étanche sur des embases préalablement installées (Fig.7). La durée de la mesure est également de trente minutes par emplacement.

3. La mesure des flux de méthane (CH₄)

Les mesures d'émission de CH₄ des animaux au pâturage peuvent être réalisées de plusieurs façons :

- Par la méthode des fluctuations turbulentes (Hendricks et al) si l'on dispose d'un analyseur rapide fonctionnant au minimum à dix Hertz (Fig.8)
- Par la collecte des gaz érucés en utilisant un traceur (SF₆) et analyse en laboratoire par chromatographie en phase gazeuse de ces gaz. La technique d'ingestion de traceur SF₆ (hexafluorure de soufre, Johnson et al. 1994) (Fig.9) permet de mesurer directement le méthane émis par éructation. Le SF₆ relâché progressivement par la capsule ingérée par l'animal se combine au CH₄ produit dans le rumen. La quantité de SF₆ total ingéré par l'animal étant connue, il est possible d'estimer la production de méthane par l'animal (Crainger.C et al. 2007).

Par une méthode indirecte de mesure de l'azote excrété par les animaux :

L'analyse par Spectrométrie dans le Proche Infra-Rouge (SPIR) de la biomasse herbacée et des fèces vise à caractériser leur composition chimique et l'estimation de l'ingéré et de l'excrété. La mobilisation de ces données dans des modèles de prédiction conduit à estimer la quantité de méthane émis.

En effet, la quantité de méthane produit lors de la fermentation entérique est proportionnelle à la quantité de matière organique ingérée digestible présente dans les fèces. Partant de cette hypothèse des équations permettant d'estimer le méthane émis en fonction de la quantité de matière organique ingérée ont pu être établies (Sauvant et al. 2012). Cette technique permet de mieux prendre en compte les variabilités régionales dans lesquelles évoluent les animaux puisqu'on considère directement ce qui été ingéré. L'analyse des fèces peut se faire par des méthodes classiques telles que des mesures d'azote fécal mais aussi par spectrométrie infra-rouge. Ce sont ces estimations, encore au stade expérimental, qui ont été utilisées dans le projet CARPAGG.

Remerciements

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet CARPAGG (CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre), cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER PO 2007-2013) et le Cirad.

Références

Aubinet M, et al. (eds.).2012. Eddy Covariance : A Practical Guide to Measurement and Data Analysis, Springer Atmospheric Sciences, DOI 10.1007/978-94-007-2351-1 13, © Springer Science Business Media B.V.

Crainger C, et al. 2007. Methane Emissions from Dairy Cows Measured Using the Sulfur Hexafluoride (SF₆) Tracer and Chamber Techniques, Journal of Dairy Science, 90(6): 2755-66.

Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grunwald T, Hollinger D, Jensen N.O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C.T, Law B.E, Meyers T, Moncrieff H, Moors E, Munger J.W, Pilegaard K, Rannik U, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S.2001. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. Agric For Meteorol 107, p. 71–77.

Hendriks D, Dolman A. J, Van der Molen M. K, and Van Huissteden J. 2008. A compact and stable eddy covariance set-up for methane measurements using off-axis integrated cavity output spectroscopy, Atmos. Chem. Phys., 8, p. 431–443.

Johnson K, Huylar M, Westberg H, Lamb B, Zimmerman P. 1994. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF₆ tracer technique. Environ. Sci. Tech. 28, p. 359–362.

Kaimal J.C and Finigan J.J. 1994. Atmospheric boundary layer flows, their structure and measurement, Oxford University Press, Oxford, 289p.

Kormann and Meixner footprint model, Boundary Layer Meteorology, vol. 99 p.207.

Moncrieff, J.B, Massheder, J.M, de Bruin H, Elbers J, Friborg T, Heusinkveld B, Kabat P, Scott S, Sogaard H, and Verhoef A. 1997. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. Journal of Hydrology 188-189, p. 589-611.

Sauvant D, Giger-Reverdin S, Serment A, Broudiscou L. 2011. INRA Prod. Anim., 24, p. 429-442.

Webster E.A, & Hopkins D. W. 1999. Contributions from different microbial processes to N₂O emission from soil under different moisture regimes. Biology and fertility of soils 22, p.331-335.

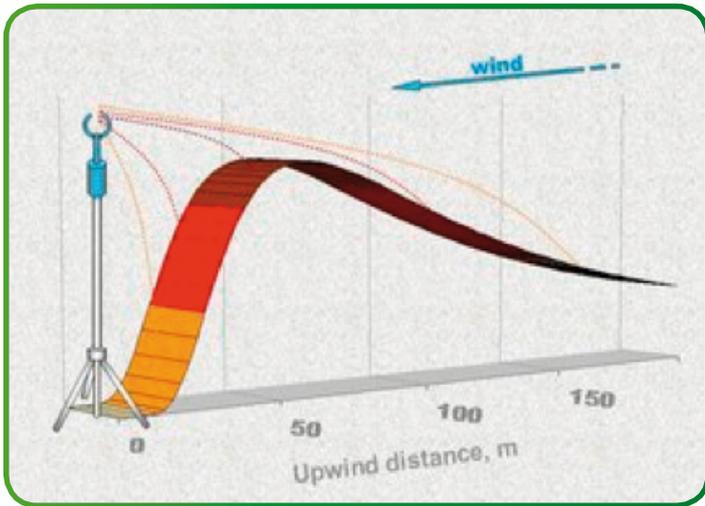


Figure 1. Mesure des flux de CO₂ par eddy covariance. Concept général de footprint – Contribution des surfaces au flux mesuré.

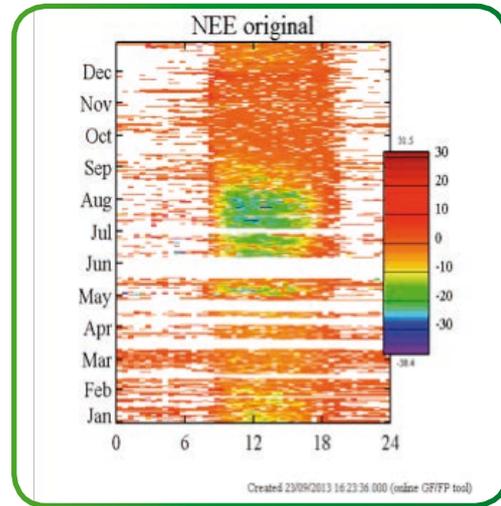


Figure 4. Bilan annuel de C (g.m⁻²) avant gap filling.

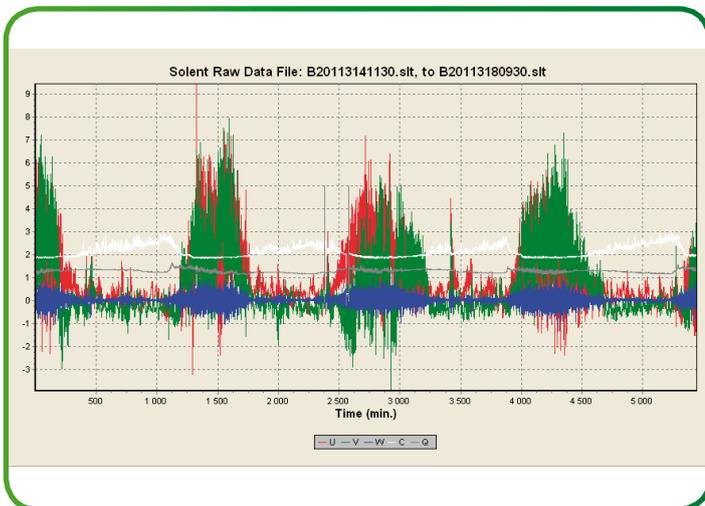


Figure 2. Les mesures de vent et de concentration de CO₂ et H₂O sont effectuées à la fréquence de 10 Hz. Exemple de mesures instantanées en prairies tropicales sur quelques jours.

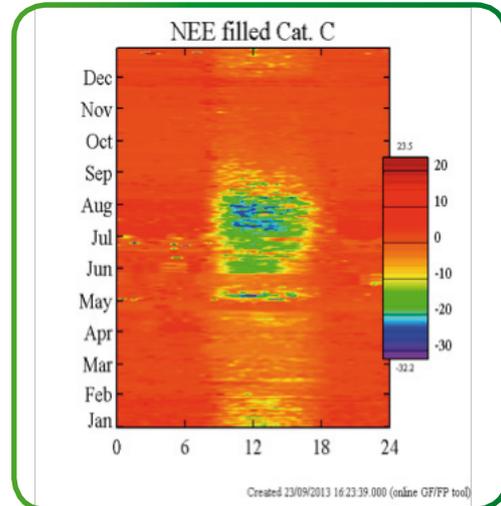


Figure 5. Bilan annuel de C (g.m⁻²) après gap filling.

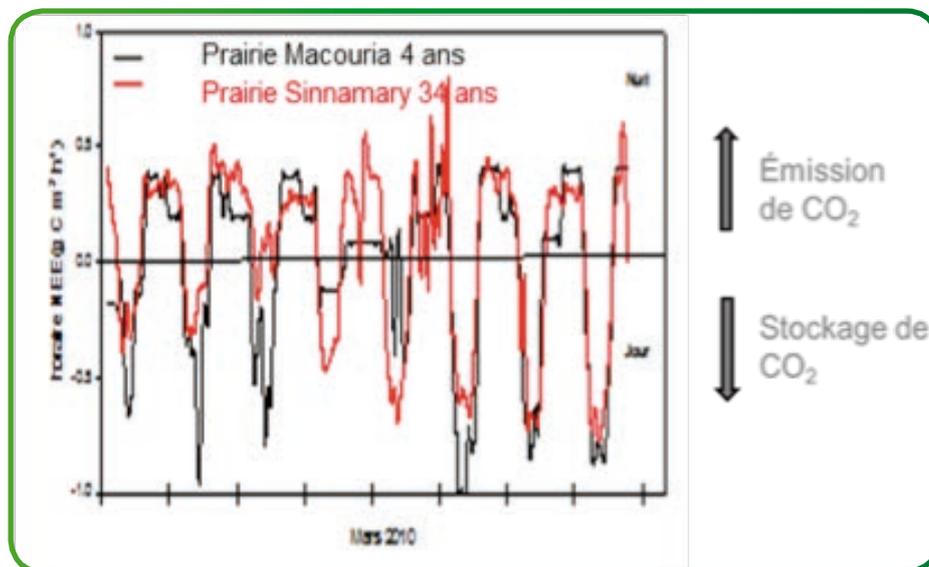


Figure 3. Valeurs journalières de mesures de CO₂.



Figure 6.
Chambre automatique
de mesure de N_2O .
(Photo : H. Raguét, Look at Sciences)



Figure 7.
Chambre statique de mesure
de N_2O et CH_4 .



Figure 8.
Analyseur permettant de mesurer le méthane par
la méthode d'eddy corrélation.



Figure 9.
Collecte des gaz érucés en utilisant
un traceur (SF_6).
(Photo : H. Raguét, Look at Sciences)

Flux et bilan de carbone en forêt tropicale humide guyanaise : le dispositif « Guyaflux »

BURBAN B¹, BONAL D²

¹ INRA, UMR EcoFoG, 97310 Kourou, Guyane française

² INRA, UMR EEF, 54280 Champenoux, France

Introduction

Le rôle des forêts tropicales humides dans le puits de carbone biosphérique reste incertain. En particulier, selon que les forêts considérées sont intactes, c'est-à-dire sans impact de l'Homme autre que les changements climatiques, ou au contraire perturbées par des activités humaines (exploitation), les bilans annuels de carbone peuvent varier très fortement et peu de mesures précises ont été réalisées.

Afin de caractériser les flux de CO₂ entre un écosystème forestier tropical humide en Guyane non perturbé récemment par l'Homme et l'atmosphère, et calculer des bilans annuels de ces flux pour évaluer le stockage / déstockage de carbone par cet écosystème, le dispositif « Guyaflux » a été installé en 2003 à proximité de Sinnamary (Fig. 1). Nous présentons ici des résultats sur les variations intra-annuelles (saisonniers) de ces flux et sur le bilan annuel de carbone obtenu depuis 10 années.

1. Un mot de méthodologie

Les flux nets de CO₂ entre un écosystème et l'atmosphère (« Net Ecosystem Exchange » en anglais) représentent la différence entre la photosynthèse brute (assimilation de CO₂ par les plantes) et la respiration brute (dégagement de CO₂ par tous les organismes vivants).

Afin de mesurer ce flux net, nous utilisons la méthode des corrélations turbulentes (« eddy correlation » en anglais), qui est basée sur les transferts de masse et d'énergie par les turbulences de l'air et le vent (Falcimagne 2013). Cette méthode a été initialement développée par des physiciens de l'air pour comprendre les phénomènes de turbulences créées par les avions au niveau des aéroports. Elle a été adaptée dans les années 90 pour calculer des flux de gaz entre des écosystèmes et l'atmosphère. Le mot « turbulence » vient du fait que l'on utilise les propriétés des turbulences de l'air qui « brassent » l'ensemble des gaz au-dessus d'un écosystème étudié, et le mot « corrélation » vient de la méthode mathématique utilisée pour le calcul du flux net.

Afin d'effectuer ce calcul, il convient de mesurer à haute fréquence (c'est-à-dire environ 20 fois par seconde) la vitesse verticale du vent à l'aide d'un anémomètre sonique et la concentration en CO₂ de l'air à l'aide d'un analyseur infrarouge, au-dessus de l'écosystème considéré. Tout en restant dans la couche d'air juste au-dessus de l'écosystème considéré, appelée « couche limite », la hauteur de mesure de ces deux variables au-dessus de l'écosystème définit la surface d'intégration des flux nets considérés. En d'autres termes, plus les mesures sont réalisées hautes par rapport au sommet de la forêt, plus le flux net calculé représentera les échanges de gaz sur une surface de forêt importante. Et c'est clairement l'un des avantages de cette méthode : elle est spatialement intégrative et permet donc de calculer ces flux nets pour une forêt, une prairie, ou même une ville sur de grandes surfaces. Par exemple, en positionnant les appareils à 20 m au-dessus de la forêt sur le site de Guyaflux, nous considérons que nous intégrons les flux nets sur une surface de 50-100 ha de forêt.

En 2003, dans le cadre du contrat Plan-Etat-Région 2000-2006, l'INRA, le Ministère de la Recherche et l'Europe ont financé l'installation d'une tour de 55 m de haut afin d'installer les capteurs 20 m au-dessus de la forêt et l'ensemble des équipements microclimatiques permettant la mesure de ces flux (Fig. 1).

2. Variations journalières des flux nets de CO₂

Quelles variations journalières montrent les échanges nets de CO₂ entre l'écosystème et l'atmosphère ? A l'aide de ce dispositif, nous confirmons qu'au cours de la nuit, la forêt dégage

du CO₂ vers l'atmosphère : elle respire, et représente donc une SOURCE de carbone vers l'atmosphère. De jour, la respiration reste active et forte, mais l'absorption de CO₂ par la photosynthèse des feuilles est plus forte que la respiration : le flux net de CO₂ s'inverse, ce qui signifie que la forêt absorbe plus de CO₂ qu'elle n'en rejette : à partir de 8-9h du matin et jusque 16-17h, elle devient un PUICTS de carbone pour l'atmosphère. Nous avons montré par ailleurs que le rayonnement solaire, la température de l'air et l'humidité de l'air sont les facteurs climatiques qui expliquent très fortement ces variations journalières.

3. Variations saisonnières des flux nets de CO₂

Quelles variations saisonnières montrent les échanges nets de CO₂ entre l'écosystème et l'atmosphère ? Le climat de la Guyane varie en effet au cours de l'année (cf. bandeau en haut Fig. 2) et nous avons cherché à comprendre l'influence des variations du climat sur le bilan journalier des échanges nets de CO₂ (Fig. 2). Quand les valeurs sont positives, la forêt rejette plus de CO₂ vers l'atmosphère qu'elle n'en absorbe. Quand ces valeurs sont négatives, cela signifie que la forêt est un puits de CO₂ sur cette période.

Nous observons que la forêt sur le dispositif Guyaflux montre une alternance de périodes au cours de l'année où elle est une source ou un puits de CO₂ (Bonald et al. 2008). De plus, les périodes de source correspondent aux saisons des pluies, alors que les périodes de puits correspondent aux saisons sèches. Nous avons montré que le rayonnement solaire est le facteur principal qui contrôle ces bilans : quand ce rayonnement est faible en saison des pluies, la respiration est plus forte que la photosynthèse et la forêt dégage du CO₂ ; Quand le soleil est fort en saison sèche, la forêt absorbe plus de CO₂ par photosynthèse qu'elle n'en rejette par la respiration. La sécheresse du sol diminue plus fortement la respiration que la photosynthèse, ce qui accentue encore l'influence du rayonnement.

4. Bilan annuel des flux nets de CO₂

Ce dispositif nous permet également de calculer la somme des flux nets de CO₂, c'est-à-dire le BILAN, sur une période qui nous intéresse. Par exemple, le bilan calculé sur une année, depuis l'installation en 2003, montre que la forêt autour de Guyaflux absorbe en moyenne 2.5 tonnes de carbone par hectare et par an. Cela signifie que cet écosystème STOCKE un peu de carbone chaque année : il est un PUICTS de carbone pour l'atmosphère.

Néanmoins, ce bilan annuel varie fortement d'une année sur l'autre et nous étudions actuellement l'origine de ces variations (différentes intensités de la saison sèche ou de la saison des pluies ?).

L'écosystème stocke donc chaque année un peu plus de CO₂ qu'il ne rejette, et il est légitime de s'interroger du devenir de ce CO₂ dans l'écosystème. Les travaux de Rutishauser et al. (2010) et Hérault et al. (2013) dans des parcelles forestières à proximité du dispositif Guyaflux (13-14-15) montrent que chaque année, environ 1.3 tonnes de carbone par hectare et par an sont stockées dans le tronc et les branches des arbres. La différence entre ce stockage et le bilan effectué au niveau de la tour peut s'expliquer par une augmentation également de la biomasse racinaire et par le stockage de carbone dans le sol sous forme de matière organique. Des travaux sont en cours pour confirmer ces hypothèses.

Conclusions

Le dispositif Guyaflux permet de comprendre le rôle de la forêt tropicale humide non perturbée par l'Homme dans le puits de carbone biosphérique. La forêt étudiée depuis 10 ans est un puits de carbone important, ce qui souligne la nécessité de protéger cet écosystème non seulement pour la biodiversité qu'il renferme mais également pour son rôle dans la régulation des émissions de gaz à effet de serre.

Ce dispositif est unique en Guyane et seuls 3 autres dispositifs en Amazonie (2 au Brésil et 1 au Costa Rica) enregistrent les échanges de CO₂ entre la forêt tropicale humide Amazonienne et l'atmosphère. Nous travaillons actuellement à la comparaison des variations saisonnières des flux de CO₂ et des bilans annuels avec ces autres dispositifs. Nous cherchons également à modéliser ces flux afin de simuler l'influence des changements climatiques sur le rôle des forêts tropicales humides dans le puits de carbone biosphérique. Il importe également de confronter ces bilans avec ceux des prairies étudiées dans le cadre du projet CARPAGG et de les modéliser afin de comprendre les conséquences de la transformation des forêts en prairies en termes de flux de CO₂.

Remerciements

Les auteurs remercient l'INRA, la région Guyane, le CNES, le Ministère de la recherche, et l'Europe qui ont permis l'installation de ce dispositif et financé les travaux de recherche associés sur la période 2003-2007 (Fonds FEDER PO 2000-2006) et 2008-2012 (Fonds FEDER PO 2007-2013).

Références

Bonal D, Bosc A, Goret J.Y, Burban B, Gross P, Bonnefond J.M, Elbers J, Ponton S, Epron D, Guehl J.M, & Granier A. 2008. The impact of severe dry season on net ecosystem exchange in the Neotropical rainforest of French Guiana. *Global Change Biology*, 14, p. 1917-1933.

Falcimagne R. 2013. Quelques éléments de théorie sur la mesure des flux de C dans les écosystèmes. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 1, 4 p.

Hérault B, Freycon V & Molto Q. 2013. Stocks de C dans les forêts tropicales humides. Forêts naturelles & Reconstitutions post-exploitation. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 3, 4 p.

Rutishauser E, Wagner F, Hérault B, Nicolini E.A, & Blanc L. 2010. Contrasting above-ground biomass balance in a Neotropical rain forest. *Journal of Vegetation Science* 21, p. 672-682.



Figure 1. Photo de la tour à flux.



Figure 1. Photo de la tour à flux.

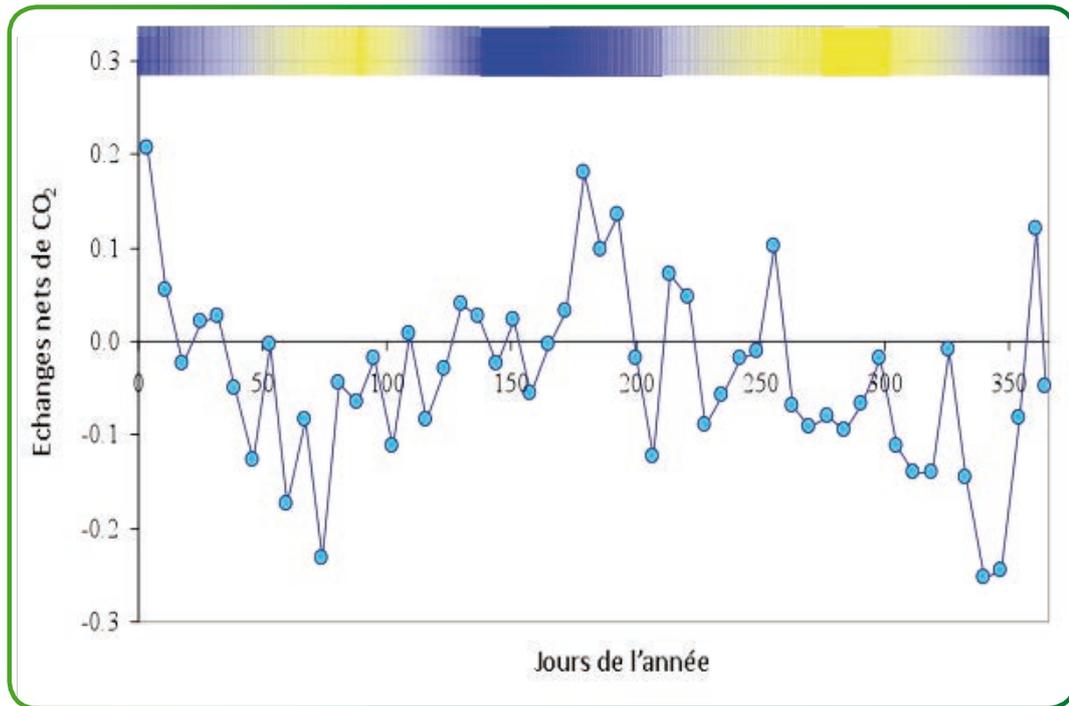


Figure 2. Variations saisonnières des échanges nets de CO₂ entre l'écosystème et l'atmosphère. Le bandeau en haut montre l'alternance de période de sécheresse (en jaune) ou de pluie (en bleu) pour une année typique. Un point bleu représente la somme des échanges nets sur 10 jours consécutifs.

Flux de C échangés entre l'écosystème prairial et l'atmosphère en Amazonie française

STAHL C^{1,2}, KLUMPP K³, FALCIMAGNE R³, PICON-COCHARD C³ & BLANFORT V^{1,2}

¹CIRAD UMR SELMET, Campus international de Baillarguet - TA C-18, 34398 Montpellier Cedex 5, France

²CIRAD UMR SELMET, BP 701, 97387 Kourou Cedex, Guyane française

³INRA, Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial, 5 Chemin de Beaulieu 63039 Clermont – Ferrand Cedex 2

Introduction

La forêt représente environ 96% du territoire guyanais (Descroix et al. 2013). Néanmoins, la Guyane est le seul département français où le nombre d'exploitations agricoles augmente.

L'élevage de ruminant est particulièrement concerné puisqu'il occupe 31 % de la Surface Agricole Utile de la Guyane dont une partie est issue de déforestation. Cet élevage est en expansion avec comme objectif, un développement endogène du territoire visant une couverture de la consommation de viande bovine dépassant les 20% actuels.

Ce développement agricole doit se raisonner dans le cadre de la protection du patrimoine forestier et des mesures actuelles d'atténuation des gaz à effet de serre (GES) qui concernent entre autres l'agriculture. Il est notamment important de pouvoir estimer la capacité de stockage en carbone des prairies issues de la déforestation, afin de mieux comprendre les conséquences de l'augmentation de leur surface sur le bilan de carbone à l'échelle du département.

Cette estimation de stockage est réalisée par la mesure des échanges gazeux (CO₂) entre l'écosystème prairial et l'atmosphère selon la méthode des corrélations turbulentes (Aubinet et al. 2012, Falcimagne 2013, Klumpp et al. 2011). Ces mesures quantifient le rythme actuel de fixation/émission du C par les prairies et permettent de donner une image de l'ensemble des processus biologiques de l'écosystème, via le bilan net : NEE «Net Ecosystem Exchange» (Fig. 1).

1. Les sites d'études

Dans le cadre du projet CARPAGG, nos dispositifs de mesures et d'observations sont concentrés autour de deux tours à flux installées en 2010 dans 2 prairies pâturées d'âges très contrastés, l'une déforestée en 1978 (parcelle E5) et l'autre en 2008 (parcelle AV31).

Les parcelles ont des chargements instantanés respectifs de 3.5 UGB ha⁻¹ an⁻¹ et 1.3 UGB ha⁻¹ an⁻¹ sur la période 2011-2012. Les rythmes de rotation sont également sensiblement différents avec pour la parcelle AV31 un temps de séjours moyen de 12 jours, suivi d'un temps de repos de 1 mois et pour la parcelle E5 une durée de pâturage plus longue d'environ 30 jours suivi de 1 mois de repos.

Sur chacun de ses sites nous avons installé à proximité des dispositifs de mesure d'eddy covariance, des stations météorologiques.

2. Variations journalières

Le suivi journalier des échanges gazeux nous permet de suivre l'alternance du stockage de C la journée (absorption du CO₂ par la photosynthèse) et du déstockage de C la nuit (émission de CO₂ par la respiration) (Fig. 1, Falcimagne 2013).

3. Bilan annuel des échanges gazeux

Les estimations de NEE sont réalisées toutes les 30 min, soit 48 mesures par jour. Nous avons réalisé un bilan journalier pour les 2 sites sur les années 2011 et 2012.

La Figure 2 montre le cumul des bilans journaliers pour les deux années de suivi.

Les alternances de stockage/déstockage durant l'année engendrent des bilans annuels plus ou moins négatifs (par convention, un bilan négatif signifie un stockage de carbone) (Fig. 2).

Globalement, la prairie âgée reste un puits de carbone pour les 2 années, avec -1.79 ± 0.51 tC ha⁻¹ an⁻¹. En revanche, la prairie jeune montre un bilan nul avec -0.43 ± 0.63 tC ha⁻¹ an⁻¹. On peut noter que l'année 2012 a été une source de carbone pour cette prairie. Ce résultat pourrait être expliqué par le chargement en bétail plus élevé. La prairie âgée a un stockage du même ordre de grandeur qu'un pâturage en Auvergne (-2.25 tC ha⁻¹ an⁻¹ ± 1.7 , Klumpp et al. 2011)

4. Les variations saisonnières de NEE

Ces résultats montrent une forte variation saisonnière pour les deux sites. Pour 2011 et 2012, le début d'année (janvier à mars) est marqué par un stockage nul (E5) voir une émission de carbone (AV31). Ensuite du début du mois d'avril au début du mois d'octobre, on note un fort stockage des 2 sites pour les deux années. Enfin, pour la fin de l'année, la tendance est à une émission de carbone pour les deux sites sur les deux années, excepté pour le site E5 qui continu à stocker jusqu'à la fin de l'année 2011.

5. Le climat comme un des facteurs explicatifs

Ces variations saisonnières de NEE sont étroitement liées aux variations climatiques, principalement la pluviométrie qui influence la teneur en eau du sol (Fig. 3).

En effet, durant la saison des pluies que nous considérons de janvier à juillet, la teneur en eau dans le sol est assez stable et élevée. Pendant cette période, les besoins en eau de la végétation prairiale sont satisfaits. En revanche, le faible ensoleillement durant cette période pourrait expliquer le faible stockage de carbone lié à une faible photosynthèse alors que la respiration reste forte.

Durant la saison sèche, de mi-août à mi-novembre, les précipitations sont très éparpillées (entre 50 et 100 mm par mois, contrairement à la saison des pluies avec 300-500 mm par mois). Ces faibles précipitations engendrent une très forte diminution de la teneur en eau du sol.

En revanche, au cours de la saison sèche, le rayonnement est très fort puisque le couvert nuageux est quasi nul. Il en résulte des conditions climatiques de début de saison sèche très favorables aux fonctionnements des plantes, comme nous pouvons le voir avec le fort stockage des deux sites (Fig. 2). Ce fort stockage s'explique par une photosynthèse plus forte que la respiration. Cependant, à partir de la fin de saison sèche (mi-octobre), suite à plusieurs semaines consécutives sans fortes précipitations, les prairies montrent une tendance à l'émission de carbone.

6. Comparaison des mesures de flux avec la production de biomasse aérienne et souterraine

Durant les deux années de suivi de mesure des échanges gazeux (CO₂) entre l'écosystème prairial et l'atmosphère, nous avons également suivi la production de biomasse aérienne et souterraine à l'échelle mensuelle (Fig. 4).

Ce suivi nous a permis à la fois de caractériser la quantité d'herbe disponible pour le bétail, mais également la productivité aérienne et souterraine des deux sites. La mesure de la biomasse non pâturée (sous cage de mise en défens) est équivalente à la productivité de la végétation en place, elle renseigne directement sur le potentiel productif du site, sans l'effet du pâturage.

Concernant la biomasse disponible, on observe que la prairie jeune dispose d'une quantité d'herbe moyenne sur l'année plus faible (2.04 tC ha⁻¹ en 2011 et 1.61 tC ha⁻¹, en 2012) que la prairie âgée pour ces mêmes périodes (3.02 tC ha⁻¹ et 4.89 tC ha⁻¹).

Ces résultats suggèrent que les pratiques d'élevage de la prairie âgée conduisent à une plus grande quantité d'herbe disponible pour le bétail.

Les résultats de la productivité aérienne et souterraine des prairies nous permettent de nous affranchir des pratiques d'élevage et de ce fait, suivre directement l'effet du climat et de la nature du sol sur la production de biomasse. Globalement, pour la production aérienne on voit qu'en 2011 les résultats sont assez similaires entre les sites (AV31 : 22.3 et E5 : 21.7 kg ha⁻¹J⁻¹, respectivement) alors qu'en 2012 on observe une nette diminution pour AV31 (17.8 kg ha⁻¹J⁻¹) contrairement à E5 (27.1 kg ha⁻¹J⁻¹). alors qu'en 2012 on observe une nette diminution pour AV31 (1.78 g m² J⁻¹) contrairement à E5 (2.71 g m² J⁻¹). Les conditions climatiques semblent avoir impactées fortement la productivité de la prairie jeune. Ces résultats suggèrent que la plus faible biomasse disponible en 2012 est due au pâturage mais aussi au climat.

La productivité de la partie souterraine est légèrement plus forte que l'aérienne pour AV31 et E5 en 2011 (respectivement 39.7 et 37.4 kg ha⁻¹J⁻¹). Concernant 2012, on note également une différence entre les 2 mêmes sites (respectivement 18.7 et 28.2 kg ha⁻¹J⁻¹).

L'ensemble de ces résultats sont concordants avec les résultats de NEE (Fig. 2) où en 2012 la prairie jeune montre un bilan proche de zéro.

Conclusion

Nos résultats montrent que la transformation de la forêt tropicale en prairie peut conduire à rétablir la fonction de stockage de carbone de l'écosystème. Ce stockage se produit principalement dans le sol (Blanfort et al. 2013), il est conditionné par l'importance des échanges de CO₂ entre l'écosystème prairial et l'atmosphère (Falcimagne 2013). Les mesures de flux menées en parallèle en forêt montrent que celle-ci atteint un stockage de l'ordre de -2.59 tC ha⁻¹ an⁻¹ (Bonal et al. 2008, Burban & Bonal 2013). Nos mesures en prairie jeune montrent un bilan globalement nul pour les 2 années de suivi. En revanche, pour la prairie âgée, on note un stockage proche de celui de la forêt avec -1.78 tC ha⁻¹ an⁻¹. Ces résultats soulignent la nécessité de maintenir les pâturages sur plusieurs décennies. Le stockage de C souterrain en prairie, résultant des flux de CO₂, s'avère en effet équivalent ou supérieur à celui du sol des forêts d'origine 30 ans après la mise en place des prairies (Blanfort et al. 2013), sans pour autant compenser la perte du stock de C aérien de la forêt lors de la déforestation (-200 tC ha⁻¹, Rutishauser et al. 2010, Hérault et al. 2013).

Les mesures de flux nécessitent une période de mesure suffisamment longue pour intégrer la variabilité climatique inter annuelle et conforter les incertitudes des mesures actuelles. L'intégration du dispositif CARPAGG à l'Observatoire Guyanais du Carbone et des gaz à effet de serre (Sirder et Oulliac 2013) va permettre d'obtenir des références consolidées qui alimenteront en autres l'observatoire dont la mise en place vise à accompagner la politique carbone et gaz à effet de serre de la Guyane concernant la gestion des forêts, le développement agricole et l'aménagement du territoire. Au-delà des problématiques territoriales et régionales, il s'agit aussi de continuer de contribuer aux questions scientifiques actuelles sur le rôle et les enjeux des écosystèmes pâturés dans le réchauffement climatique et dans le cadre du changement d'utilisation des terres. L'élevage reste certes un important émetteur de GES, mais il est confirmé que ce secteur a désormais les moyens de réduire de façon significative ses émissions notamment en intégrant le stockage de carbone des systèmes pâturés. L'élevage pourrait réduire de 30% ses émissions de GES par un plus grand usage de meilleures pratiques agricoles et des technologies existantes (Lecomte et Blanfort 2013).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les éleveurs qui ont permis de réaliser les mesures sur leurs parcelles. Ces travaux sont

réalisés dans le cadre du projet CARPAGG (CARbone des PATurages de Guyane et Gaz à effet de serre), cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER PO 2007-2013) et le Cirad.

Références

Aubinet M, et al. 2012. (eds.) Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis, Springer Atmospheric Sciences, DOI 10.1007/978-94-007-2351-1 13, © Springer ScienceC Business Media B.V.

Blanfort V, Ponchant L, Dézécache C, Stahl C, Freycon V, Picon-Cochard C, Blanc L, & Fontaine S. 2013. Dynamique du carbone dans les sols de prairies issues de la déforestation de la forêt guyanaise. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 3, 4 p.

Bonal D, Bosc A, Goret J.Y, Burban B, Gross P, Bonnefond J.M, Elbers J, Ponton S, Epron D, Guehl J.M, & Granier A. 2008. The impact of severe dry season on net ecosystem exchange in the Neotropical rainforest of French Guiana. *Global Change Biology*, 14, p. 1917-1933.

Burban B, & Bonal D 2013. Flux et bilan de carbone en forêt tropicale humide guyanaise : le dispositif « Guyaflux ». In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 3, 4 p.

Descroix L, Brunaux O, & Bezard V. 2013. Bilan carbone et gestion forestière. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 4, 4 p.

Falcimagne R. 2013. Quelques éléments de théorie sur la mesure des flux de C dans les écosystèmes. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 1, 4 p.

Hérault B, Freycon V, & Molto Q. 2013. Stocks de C dans les forêts tropicales humides. Forêts naturelles & Reconstitutions post-exploitation. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 3, 4 p.

Klumpp K, Tallec T, Guix N, & Soussana J-F. 2011. Long-term impacts of agricultural practices and climatic variability on carbon storage in a permanent pasture. *Global Change Biology*, 17, 3534-3545.

Lecomte P, & BLANFORT V 2013. Elevage, gaz à effet de serre et changements d'utilisation du territoire. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée

« Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 1, 4 p.

Rutishauser E, Wagner F, Hérault B, Nicolini E.A, & Blanc L.

2010. Contrasting above-ground biomass balance in a Neotropical rain forest. *Journal of Vegetation Science* 21, p. 672-682.

Sirder H, & Oulliac B. 2013. Vers un observatoire guyanais en du carbone et des gaz à effet de serre (GES). In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 4, 4 p.

Stockage de C dans une prairie :

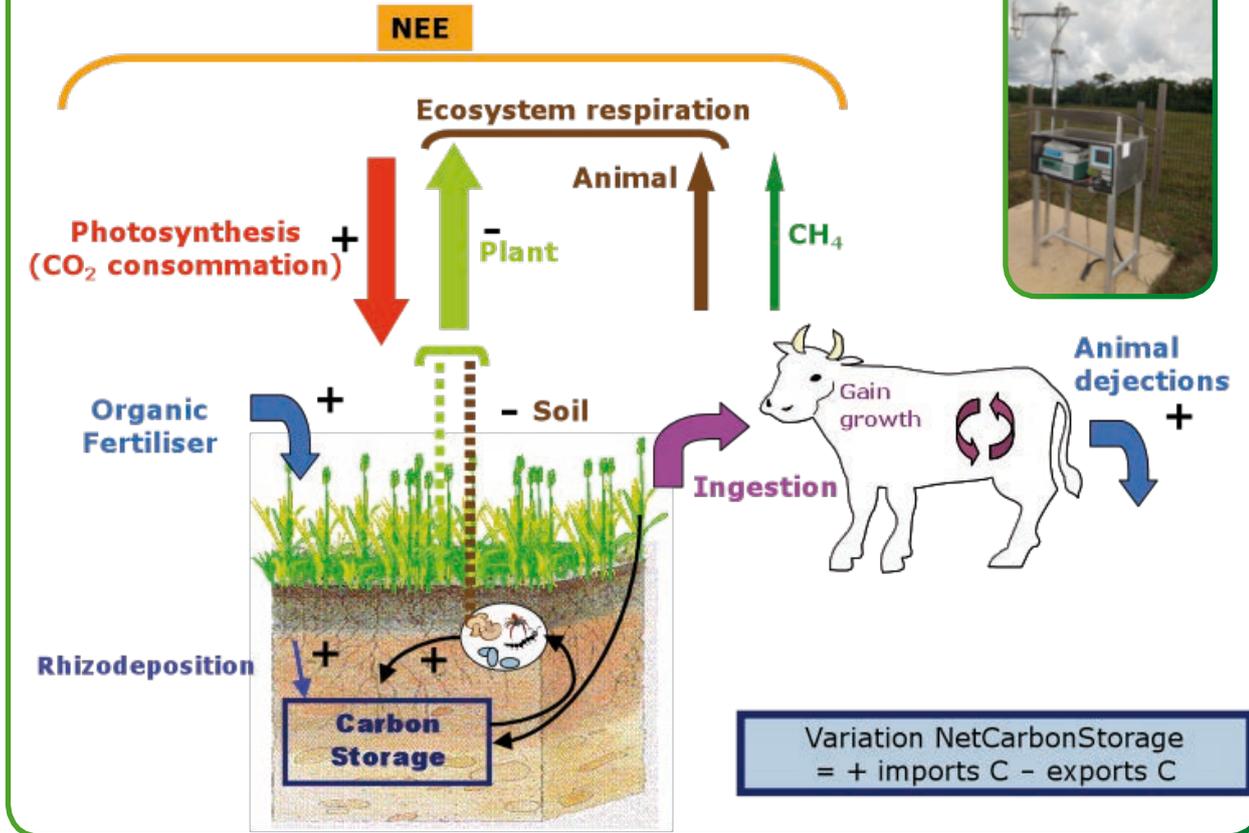


Figure 1. Schéma récapitulatif montrant les différents compartiments émetteur ou stocker de CO₂ dans l'écosystème prairial, qui aboutissent au bilan net d'échange de carbone (NEE, Net Ecosystem Exchange). Photographie d'une tour à flux en prairie permettant de mesurer le NEE.

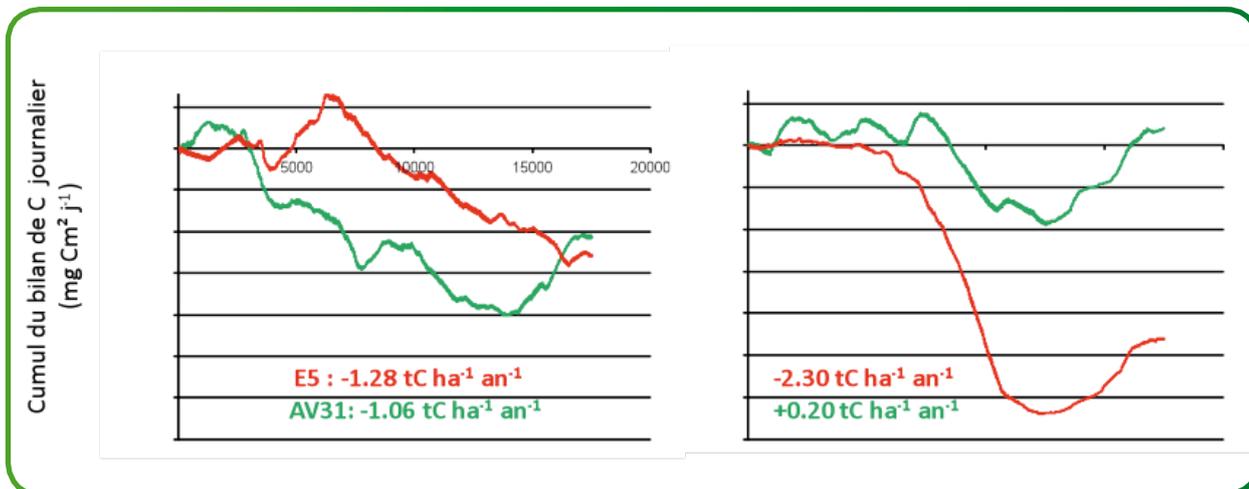


Figure 2. Bilan annuel de C (mg C m² J⁻¹) pour le pâturage de 5 ans (vert) et de 35 ans (rouge) pour l'année 2011 et 2012.

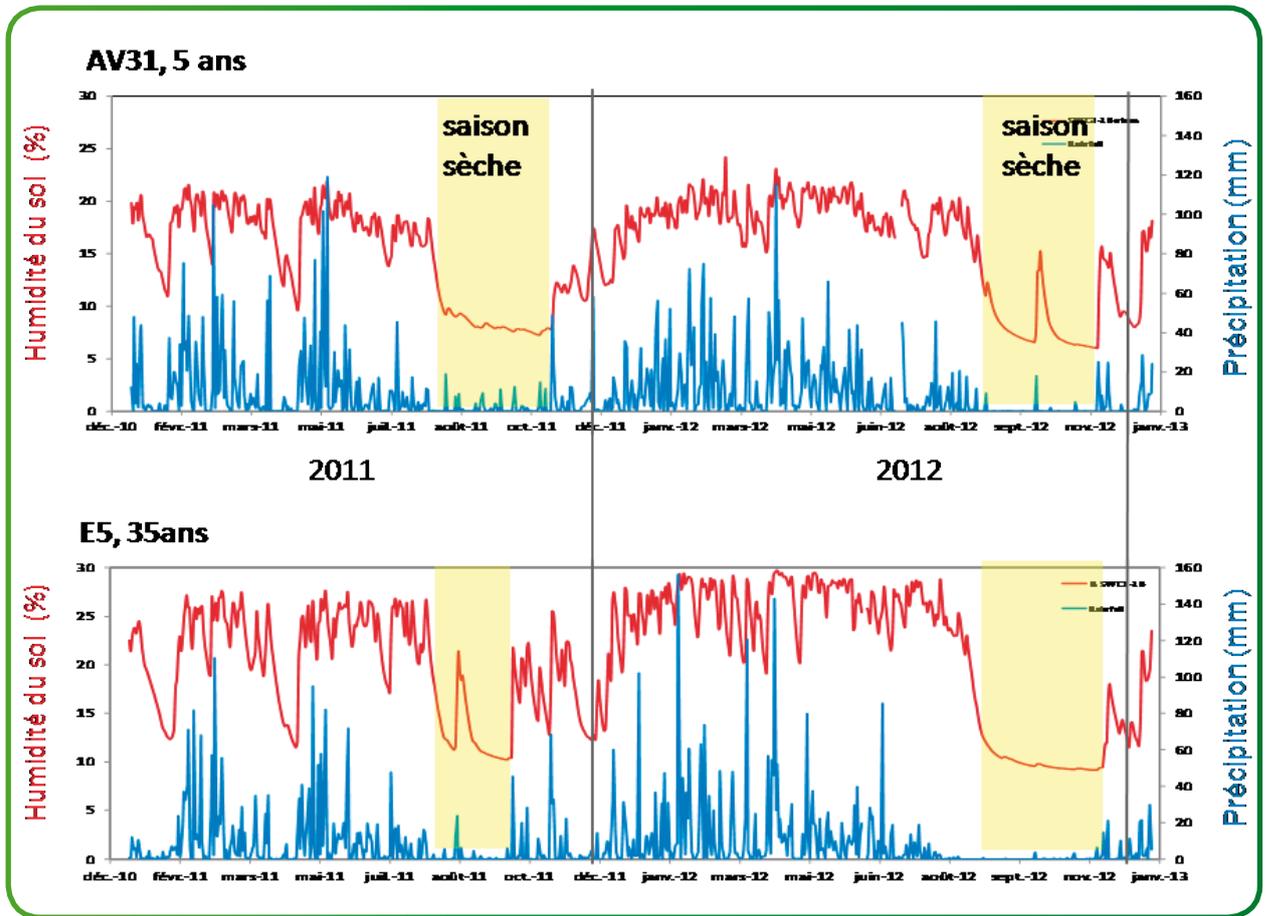


Figure 3. Variation saisonnière du climat local des 2 prairies. La précipitation (bleue) et l'humidité du sol (rouge) montrent de forte variation durant les 2 années de suivi.



Figure 4. Récolte mensuelle de la biomasse racinaire dans des filets (photo de gauche) et de la biomasse aérienne, disponible pour le bétail ou protégées par une cage (photo de droite).

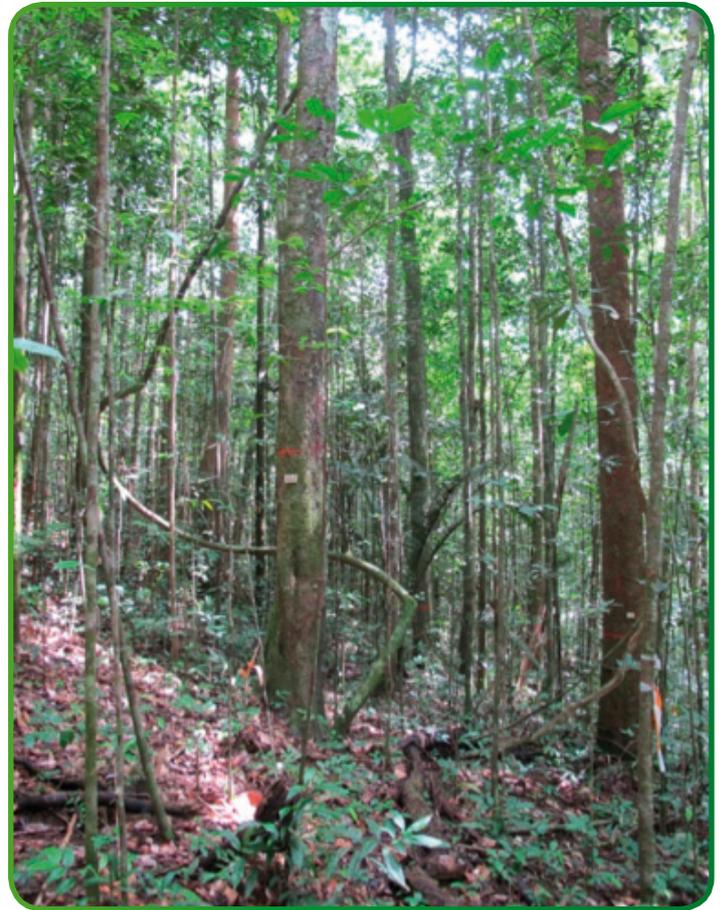
SESSION 3.

Les stocks de carbone et leurs dynamiques dans les différents compartiments des écosystèmes forestiers et prairiaux



Vue des parcelles du dispositif Guyafor à Paracou où est réalisée l'estimation de la biomasse d'une parcelle forestière inventoriée. En forêt, le carbone est majoritairement stocké dans la biomasse aérienne.

(Photo V Blanfort / C Stahl)



*Vue d'une prairie à *Brachiaria humidicola* issue de déforestation d'un élevage bovin à Sinnamary. Dans les écosystèmes prairiaux, le carbone est majoritairement stocké dans la matière organique du sol.*

(Photo V Blanfort / C Stahl)

Stocks de C dans les forêts tropicales humides

Forêts naturelles & Reconstitutions post-exploitation

HERAULT B¹, FREYCON V², MOLTO Q¹

¹ Cirad, UMR EcoFoG, Campus agronomique, 97310 Kourou

² Cirad, UR B&SEF, Campus de baillarguet, 34980 Montferrier-sur-Lez

Introduction

Dans le cadre des accords internationaux sur la limitation des émissions de GES et de l'augmentation de la température, le cas des forêts et en particulier des forêts tropicales est un point important. En effet, le stock de carbone contenu dans ces forêts est non seulement élevé mais aussi dynamique, i.e. l'homme et ses activités en sont les premiers déterminants. Cependant, les forêts tropicales étant principalement situées dans des pays au développement rapide (bassin de l'Amazonie, bassin du Congo, Asie du Sud-est), la forte croissance économique et démographique de ces territoires entraîne leurs responsables politiques à ne pas souhaiter un développement bridé par des protections trop strictes de leurs ressources naturelles.

Les forêts tropicales recouvrent une surface de 1949.10⁶ ha, c'est à dire 50% de la surface forestière mondiale. Elles sont situées dans la zone intertropicale sur trois continents : L'Amérique du Sud, l'Afrique, et l'Asie du Sud-est. Ainsi réparties, les forêts tropicales sont soumises à des régimes climatiques variés (Malhi et al. 2004). Les écosystèmes forestiers se singularisent des autres écosystèmes terrestres (e.g. culture, savanes, déserts, toundras) par leurs stocks importants de carbone stockés dans la végétation. Dans les forêts tropicales, ce stock "aérien" constitue jusqu'à 60% de la biomasse : les arbres (150-200 tC ha⁻¹), les lianes et palmiers (15-30 tC ha⁻¹) et la litière, y inclus le bois mort, (20-40 tC ha⁻¹). Les 40% restant se retrouve dans le sol sous forme de racines (30-80 tC ha⁻¹) et de matière organique (75-100 tC.ha⁻¹). La distribution verticale du carbone stocké dans la matière organique décroît de manière exponentielle avec la profondeur. A titre indicatif, sur le site de Paracou, 50% du carbone du sol est situé à moins de 50 cm de profondeur, 90% à moins de 1m (Fig. 1).

1. Cartographier le carbone

1.1. A l'échelle mondiale

d'accélération du changement climatique forcé par les émissions anthropiques de CO₂, la quantification des stocks de carbone à l'échelle mondiale est devenue un enjeu majeur. Le stock mondial de carbone forestier est estimé à 861 ± 66 Pg C avec 383 ± 30 Pg C (44%) dans les sols, 363 ± 28 Pg C (42%) dans la biomasse vivante, 73 ± 6 Pg C (8%) dans le bois mort, et 43 ± 3 Pg C (5%) dans la litière (Baccini et al. 2012). Géographiquement, 471 ± 93 Pg C (55%) dans les forêts tropicales, 272 ± 23 Pg C (32%) en zone boréale, et 119 ± 6 Pg C (14%) dans les forêts tempérées. La quantité de carbone stockée par hectare de forêts tropicales et boréales est relativement similaire (242 versus 239 Mg C ha⁻¹) alors qu'elle chute à 155 Mg C ha⁻¹ en forêt tempérée. Bien que les forêts tropicales et boréales stockent le plus de carbone, elles sont fondamentalement différentes dans leurs structures : les forêts tropicales ont 56% du carbone stocké dans la biomasse et 32% dans le sol, alors que les forêts boréales ont seulement 20% stocké dans la végétation et 60% dans le sol (Baccini et al. 2012).

Si le carbone stocké dans les forêts tropicales suscite tant d'intérêt, c'est parce qu'il est susceptible d'être émis dans l'atmosphère. La déforestation et le changement d'usage des terres en zone tropicale sont responsables de 15 à 20 % des émissions de GES mondiales (Malhi & Grace 2000, Fearnside & Laurance 2004, Houghton 2005). A l'inverse, si des forêts sont plantées ou se régénèrent spontanément, c'est autant de carbone qui est séquestré dans le nouveau peuplement forestier. Cependant, la résilience des forêts tropicales est assez faible, lors de la régénération naturelle, le stock de carbone de la forêt ne revient pas à son niveau antérieur en quelques décennies (Foody et al. 1996). Si le rythme global de la déforestation en zone intertropicale s'est ralenti ces dernières années, en particulier grâce au fort ralentissement observé au Brésil, il n'en reste pas moins que les émissions nettes de C liées à la déforestation sont estimées à 1.0 Pg C an⁻¹ sur la dernière décennie (Baccini et al. 2012)..

1.2. En Guyane

Un effort conséquent a été effectué depuis quelques années pour quantifier le carbone présent dans les forêts guyanaises. L'accent a clairement été mis que la propagation des incertitudes à tous les niveaux de modélisation, du modèle allométrique de hauteur utilisé au modèle spatialement explicite (Fig. 2). En effet, l'estimation de la biomasse d'une forêt nécessite l'usage de plusieurs modèles successifs. Pour quantifier l'incertitude associée à une estimation de biomasse, l'incertitude apportée par chaque modèle doit être propagée jusqu'à l'estimation finale. Pour atteindre cet objectif, nous avons (i) quantifié l'incertitude associée à l'estimation de la biomasse d'une parcelle forestière inventoriée et identifier les sources de cette incertitude, (ii) proposé des modèles adaptés permettant de réduire cette incertitude et (iii) mis en œuvre les méthodes proposées pour estimer la biomasse aérienne de la Guyane française (Molto et al. 2013a, Molto et al. 2013b).

Ce travail a permis de valoriser des années de récolte de données, depuis les inventaires papetiers effectués dans les années 70 jusqu'aux plus récents projets Guyafor (2011), Bridge (2009) et Amalin (2010). Malgré la création d'une base de données commune regroupant plus de 40 années de travaux, il n'en reste pas moins que certaines zones du territoire sont mal couvertes. Ceci est particulièrement flagrant dans la moitié Sud de la Guyane où les coûts d'acquisition étaient et demeurent très élevés. Les informations utilisées pour la propagation spatiale des estimations ponctuelles ont trait à l'indice de saison sèche (NASA-TRMM), la géologie (BRGM), le modèle numérique de terrain (NASA-SRTM) et le type de végétation. Au final, le stock de carbone forestier en Guyane est estimé à 1.04 ± 0.2 GT C (Molto et al. 2013c). Ce stock est plus faible dans le sud du territoire mais, en même temps, les incertitudes grandissent dans le sud.

La carte finale de biomasse laisse apparaître les forts effets de la composante spatiale du modèle (au nord, près des inventaires) et les faibles effets des covariables environnementales (au sud, loin des inventaires). Les valeurs de biomasse indiquées par la carte, en plus d'avoir une très forte variance, sont donc assujetties à la disponibilité des données de terrain. Comme les valeurs d'autocorrélation spatiale sont très faibles, la carte de biomasse moyenne reflète des tendances générales mais ne permet pas d'avoir une estimation précise de la biomasse locale.

En outre, ces valeurs de stocks ne doivent pas occulter des variations locales, en lien avec les conditions environnementales, qui peuvent être très élevées. Par exemple, Ferry et al. (2010) ont démontré que les valeurs de surface terrière sont en moyenne 29% moins élevées en bas-fond qu'en plateaux. Cette différence, du point de vue du bilan de biomasse, est amplifiée par une densité moyenne de bois égale à 0.65 g cm⁻³ dans les bas-fonds contre 0.75 g cm⁻³ sur les plateaux. Au final, le différentiel de biomasse peut être supérieur à 100 tC ha⁻¹ (Ferry et al. 2010).

2. Reconstitutions Post-Exploitation

2.1. L'expérience de Paracou

Le dispositif de Paracou (5°15' N, 52°55' O) est implanté sur une concession accordée au Cirad par le CNES (Centre National d'Études Spatiales), sur la commune de Sinnamary. Cette forêt appartient au faciès à *Caesalpinaceae* (Sabatier & Prévost 1990) dominé par les genres *Eperua*, *Swartzia*, *Dicorynia*, *Vouacoupa*, *Tachigali* etc.). Les familles *Lecythidaceae* (*Eschweilera sagotiana* et *spp.*, *Lecythis persistens* et *spp.*) et *Chrysobalanaceae* (*Licania*, *Couepia*) sont également abondantes. L'objectif initial du dispositif était d'étudier les effets d'interventions sylvicoles simples et peu coûteuses sur la reconstitution du peuplement forestier. Le but des travaux menés initialement à Paracou était donc d'établir un « modèle » d'exploitation forestière qui, tout en assurant une production de bois, permette le renouvellement des essences de valeur.

Différents traitements sylvicoles ont donc été testés sur les 12 parcelles de 6.25 ha mises en place à partir de 1984.

La vitesse de reconstitution de la biomasse sur les parcelles exploitées est clairement une fonction de l'intensité d'exploitation (Fig. 3). En d'autres termes, plus la forêt est perturbée lors de l'exploitation, plus l'accumulation de biomasse post-exploitation est élevée. Des modèles matriciels calibrés sur les données issues de Paracou permettent de prédire les temps de retour à la biomasse initiale. Les chiffres à retenir sont de 50-60 ans pour les traitements les plus légers (bois d'œuvre uniquement, courbes rouges sur la figure 3) alors que ces temps de retour dépassent 120 ans pour les traitements les plus forts (bois d'œuvre + dévitalisation + bois énergie, courbes bleues sur la Fig. 3). Autre résultat, la composition initiale de la communauté locale semble signer la vitesse de reconstitution. Nous avons par exemple pu montrer que les parcelles à densité de bois les plus faibles avaient les plus fortes valeurs absolues de reconstitution de la biomasse. Ces résultats ouvrent des perspectives quant à la conduite et au choix initial des peuplements à exploiter.

2.2. Le réseau TmFO

L'observatoire des forêts tropicales aménagées: «Tropical managed Forest Observatory» est un nouveau projet de suivi de la dynamique des forêts tropicales aménagées coordonné par le Cirad et financé par le programme Sentinel Landscape du macro-programme 6 du CGIAR, impliquant 15 institutions de recherche. Tmfo met en relation des réseaux de chercheurs nationaux sur des dispositifs de suivi de très longue durée dans les écosystèmes forestiers des forêts denses d'Amazonie, Afrique centrale et Asie du Sud Est (Fig. 4). Son principal objectif est d'évaluer la résilience des forêts tropicales exploitées face aux changements climatiques et leur capacité à produire des biens et des services de façon durable.

Les premiers résultats, à l'échelle amazonienne, suggèrent l'existence d'un signal commun dans l'analyse des temps de reconstitution post-exploitation de la biomasse. Même si des effets régionaux ne sont pas à exclure complètement, il semble bien que l'intensité d'exploitation et les pratiques de foresterie soient les déterminants majeurs de la dynamique de reconstitution de la biomasse.

Conclusion

Il est évident qu'à l'avenir, les méthodes de traitement du signal seront les plus efficaces pour estimer en temps réel non seulement les stocks mais aussi les flux de biomasse à une échelle pantropicale. Le signal réfléchi par la forêt doit permettre de connaître les propriétés du peuplement visé (Goetz et al. 2009). Embarqués dans des satellites, les appareils de mesure nous donneront des mesures de biomasse actualisées et standardisées. Bien au point pour les forêts boréales (Muukkonen & Heiskanen 2007), ce genre de dispositif requiert encore des améliorations en forêts tropicales. En effet, les appareillages classiques basés sur la technologie radar montrent leurs limites, par effet de saturation, sur les fortes biomasses des forêts tropicales (Le Toan et al. 2011).

Remerciements

Ce travail a été cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional, GUYASIM (FEDER n° 31032, programme opérationnel 2007-2013) et Climfor (FRB, programme 'Modélisation & Scénarios de la Biodiversité).

Références

Baccini A, Goetz S.J, et al. 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2(3), p. 181-185.

Fearnside P.M, & Laurance, W.F. 2004. Tropical Deforestation And Greenhouse-gas Emissions. *Ecological Applications*, 14(4), 982-986.

Ferry B, Morneau F, et al. 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, p. 106-116.

Foody G.M, Palubinskas G, et al. 1996. Identifying terrestrial carbon sinks: Classification of successional stages in regenerating tropical forest from Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 55(3), 205216.

Goetz, S.J, Baccini A, et al. 2009. Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods. *Carbon balance and management*, 4, 2.

Houghton R.A. 2005. Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. *Global Change Biology*, 11(6), p. 945-958.

Malhi Y, Baker T. R, et al. 2004. The above-ground coarse wood productivity of 104 Neotropical forest plots. *Global Change Biology*, 10(5), p. 563-591.

Malhi Y, & Grace J. 2000. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology & Evolution*, 15(8), p. 332-337.

Molto Q, Rossi V, et al. 2013. A Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology & Evolution*, 4(2), p. 175-183.

Molto Q, Hérault B, et al. 2013. B. Predicting tree heights for biomass estimates in tropical forests. *Biogeosciences Discussion*, 10, 8611-8635.

Molto Q. 2013. C. Estimation de biomasse en forêt tropicale humide. Thèse de doctorat, Université des Antilles et de la Guyane, 184p.

Muukkonen P, & Heiskanen J. 2007. Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data A possibility to verify carbon inventories. *Remote Sensing of Environment*, 107(4), p. 617 624.

Le Toan T, Quegan, S, et al. 2011. The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*, 115(11), 28502860.

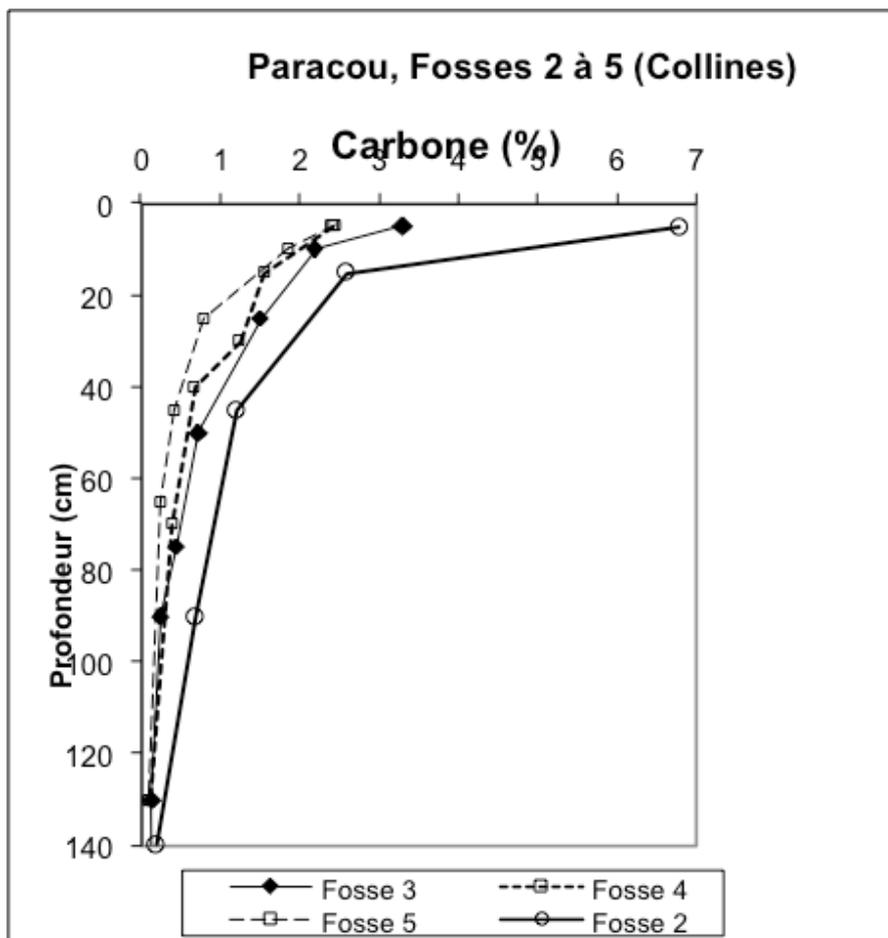


Figure 1. Distribution verticale du carbone dans le sol sur le site de Paracou (4 fosses de référence).

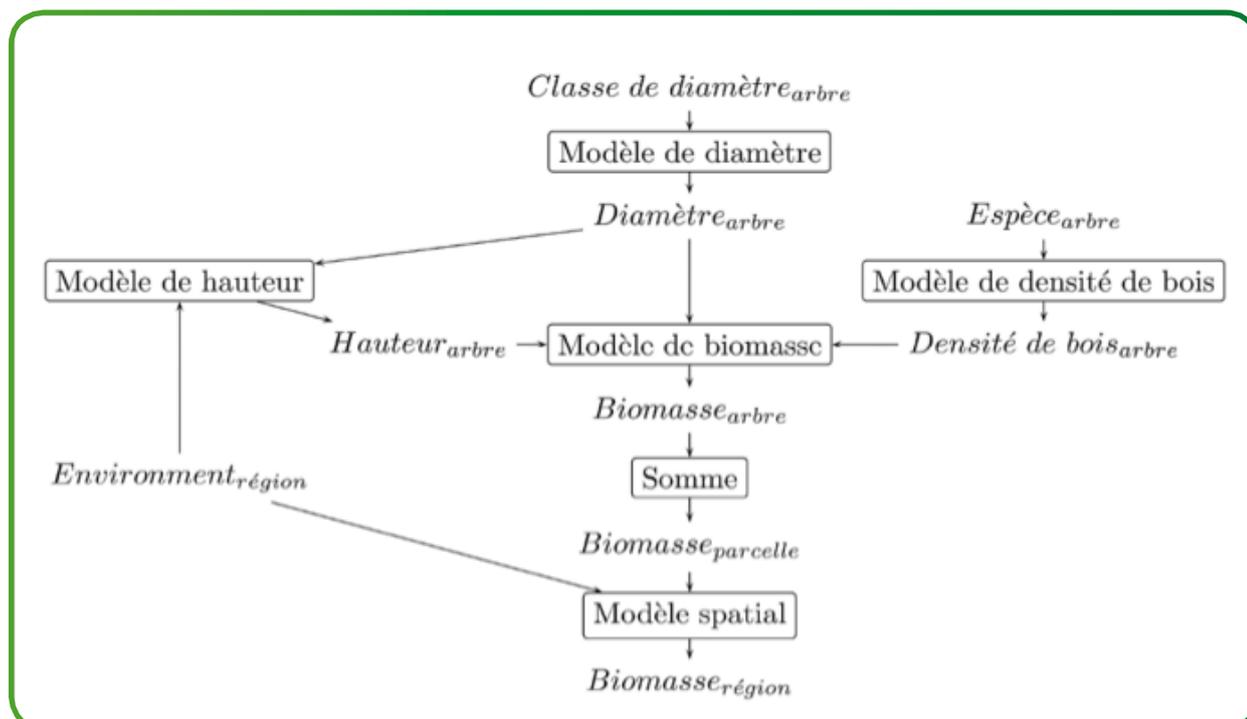


Figure 2. Modèle d'estimation du carbone forestier en Guyane (Molto et al. 2013).

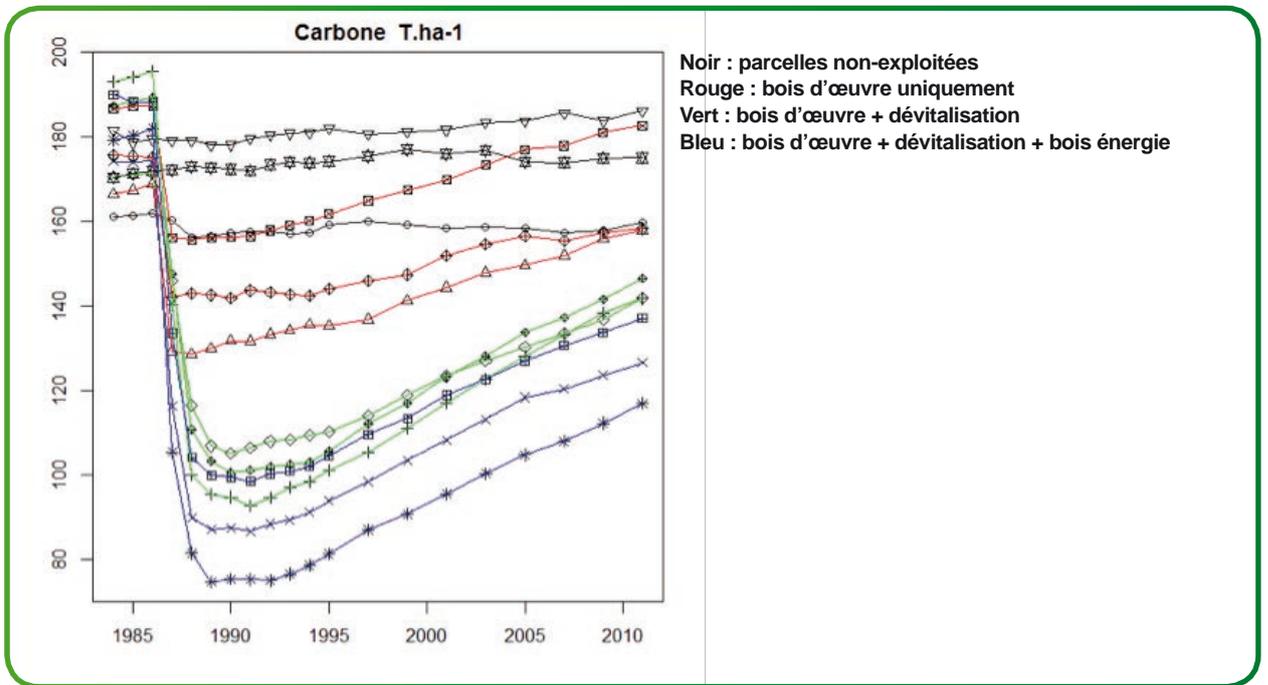


Figure 3. Reconstitution post-exploitation du carbone aérien sur le site de Paracou

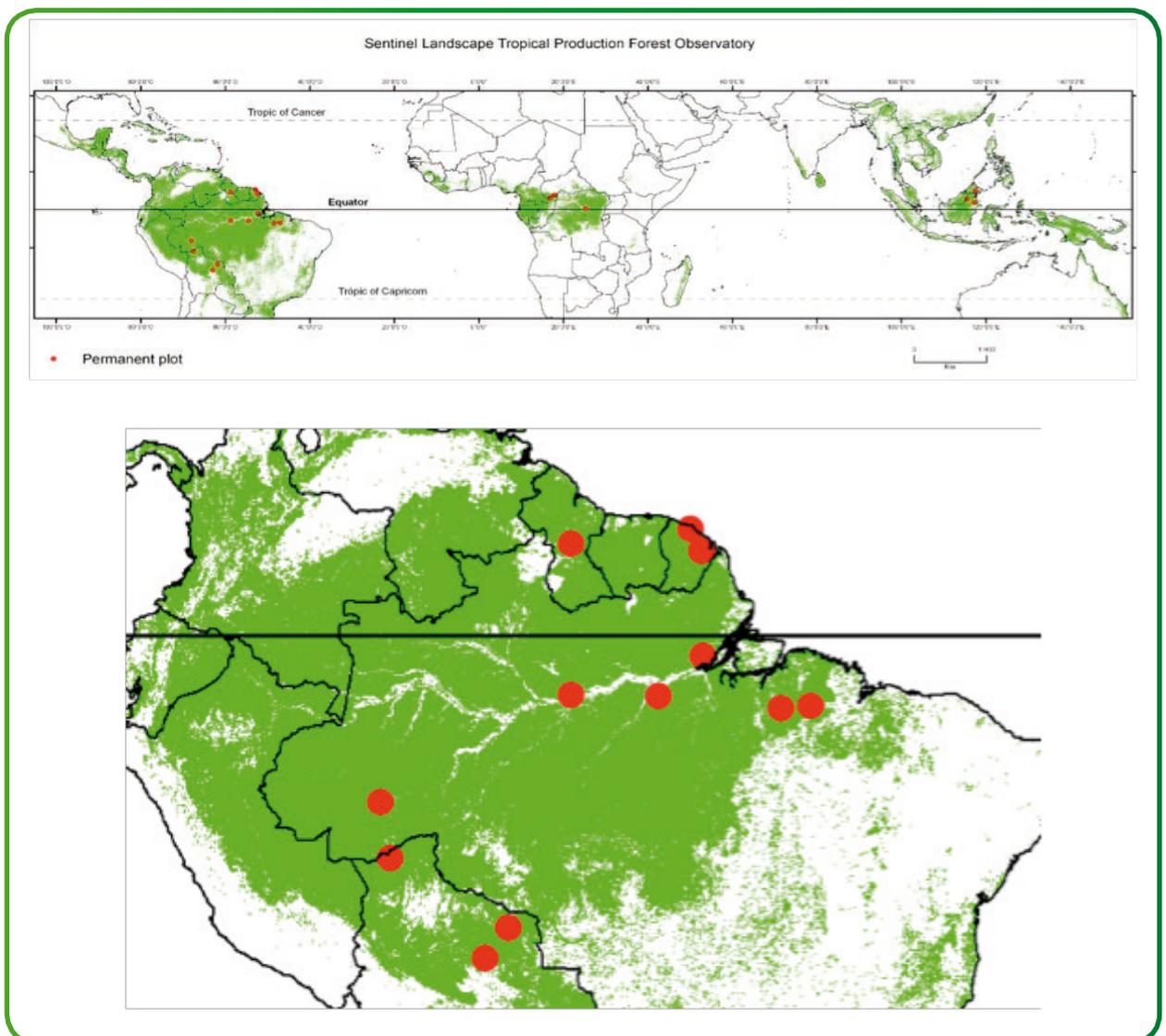


Figure 4. Le réseau TmFO (Tropical managed Forests Observatory).

Dynamique du carbone dans les sols de prairies issues de la déforestation de la forêt guyanaise

BLANFORT V^{1,2}, PONCHANT L¹, DEZECACHE C¹, FREYCON V³, PICON-COCHARD C⁴, BLANC L⁶, FONTAINE S⁴ & STAHL C^{1,2}

¹ CIRAD UMR SELMET, Campus international de Baillarguet - TA C-18, 34398 Montpellier Cedex 5, France

² CIRAD UMR SELMET, BP 701, 97387 Kourou Cedex, Guyane française

³ CIRAD UR BSEF, TA C-105 / D Campus international de Baillarguet, 34398 Montpellier Cedex 5, France

⁴ INRA UREP, Site de Crouël 234 avenue du Brezet, 63100 Clermont-Ferrand, France

⁶ CIRAD UMR EcoFoG, BP 701, 97387 Kourou Cedex, Guyane française

1. Changement d'usage des terres et carbone en Amazonie

En Amazonie où 70% des surfaces déforestées ont été converties en pâturages (Steinfeld et al. 2006), le développement de l'élevage doit se raisonner dans le cadre de la protection du patrimoine forestier et des mesures d'atténuation des GES. En effet, la déforestation pour la mise en place de prairies constitue un changement radical d'usage de la terre qui impacte durablement la production de services écosystémiques, notamment ceux liés au cycle du C. Les études menées depuis les années 90 montrent souvent des résultats divergents sur la dynamique du C du sol sous prairie mais suggèrent une tendance générale d'élévation des stocks en C du sol sous prairie jusqu'à un plateau, du fait de l'augmentation du C dérivé des graminées de la prairie (de Moraes et al. 2002, Cerri et al. 2004).

Notre étude menée en Amazonie française dans le cadre du projet CARPAGG¹ consiste à étudier la dynamique temporelle du C du sol après déforestation et la mise en place de prairies pâturées (Blanfort et al. 2012). La présence en Guyane de prairies anciennes de plus de 40 ans peu dégradées pourrait être favorable à l'accumulation de C dans le sol sur le long terme. L'objectif principal vise à déterminer la capacité de restauration sur le long terme du stockage de carbone du sol par ces prairies issues de déforestation en prenant en compte l'ensemble du premier mètre de sol.

2. Zone d'étude : les systèmes herbagers d'élevage bovin en Guyane

Notre étude concerne le littoral guyanais (Fig. 1), mince bande de terre concentrant la quasi-totalité de la population du département et des zones agricoles dont l'élevage de ruminants (31% de la SAU, source INSEE 2010). Le reste du territoire (96%) est couvert d'un massif continu de forêt tropicale (8 millions d'ha, 15% du territoire national) (Descroix et al. 2013). On observe un gradient de précipitations le long de la bande côtière, du Sud-est vers le Nord-ouest (4000 à 2000 mm). Les sols de type ferrallitique sont fortement désaturés en bases avec des textures plutôt sablo-argileuse. La filière bovine est quasi exclusivement consacrée à la production de viande avec des éleveurs naisseurs sur systèmes herbagers (Fig. 2) où la graminée *Brachiaria humidicola* constitue l'espèce fourragère dominante. Les systèmes d'élevage à majorité bovins sont plutôt de type semi-extensif (chargement moyen d'environ mère ha⁻¹) avec une faible utilisation d'intrants.

3. Méthode de mesure de la dynamique du carbone dans les sols

Les stocks en C des sols sont mesurés le long d'une chronoséquence (approche synchronique) composée de 24 prairies âgées de 6 mois à 36 ans issues de déforestation et de 4 sites de forêt témoins. Les prélèvements de sol ont été effectués sur une profondeur de 1 m en distinguant 3 horizons : 0-20 cm, 20-50 cm et 50-100 cm (plus profond que la majorité des études existantes). Sur chaque échantillon composite de terre (issu de 8 prélèvements par site), les 3 compartiments du sol ont été séparés : terre fine ($\varnothing < 2\text{mm}$), matières organiques particulières (MOP $< 200\mu\text{m}$) et racines sur lesquelles sont analysées les teneurs en C, en N ainsi que des analyses chimiques et granulométriques. La teneur en C de terre fine rapportée au volume et au poids de l'échantillon permet de calculer un stock de C pour chaque horizon afin d'obtenir un stock de C par hectare sur 1m de profondeur.

L'origine du C du sol des prairies est déterminée en mesurant la composition isotopique du C du sol. Ce fractionnement isotopique (Deleens 1976) est basé sur le fait que le cycle en C3 est plus discriminant vis-à-vis du 13C que le cycle en C4. Les arbres des forêts et les espèces en C3 présentes sur les prairies (légumineuses, adventices) ont une signature de type $\delta^{13}\text{C} \sim -27\text{‰}$ et les graminées fourragères tropicales en C4 issues de la prairie ayant remplacées la forêt ont une signature $\delta^{13}\text{C} \sim -11\text{‰}$. Un système de deux équations permet d'obtenir le stock de C à priori issu de la forêt et celui nouvellement stocké par la prairie (Blanfort et al. 2012).

4. Résultats

Dynamique temporelle du C du sol des prairies depuis la déforestation.

La dynamique de stockage du C du sol sous prairies après déforestation montre une augmentation, allant de 52 tC ha⁻¹ jusqu'à 183 tC ha⁻¹ au-delà de 30 ans (Fig. 3). Neufs sites prairiaux montrent des stocks de C cumulés sur 1 m supérieurs à 100 t C ha⁻¹. La tendance générale d'accumulation peut être scindée en 2 périodes. Durant les 2 premières décennies suivant la déforestation, on observe d'abord une forte variabilité en partie liée à des pratiques de mise en place des prairies. Ceci se traduit par une légère diminution des stocks. Ensuite, au-delà de 20 ans, on observe une augmentation significative du stock de C. La comparaison des stocks de C corrigés (notamment du taux d'argile) montre une différence significative entre les prairies de plus de 20 ans par rapport aux prairies récentes et aux forêts témoins (Tab.1). Globalement, les prairies tropicales guyanaises fonctionnent comme des écosystèmes stockeurs de carbone. Le stock des sols des prairies de plus de 30 ans, retrouve ou dépasse celui des sols forestiers d'origine.

	Forêts témoins	Prairies <20 ans	Prairies >20 ans
N	4	13	11
Stock moyen de C du sol (tC ha ⁻¹)	99.6±7.3ab	85.5±5.6b	117.7±9.6a
Différence moyenne forêt/prairie	-	-12.4±5.4 b	19.5±13.2 a

Tableau 1 : Comparaison des moyennes des stocks de C du sol entre les pâturages et la forêt d'origine par classe d'âge (Les différentes lettres indique si la différence est significative ($p < 0.05$) entre parcelles).

Des dynamiques du carbone liées à l'origine et à la répartition du C dans le sol

Les analyses isotopiques montrent que le stock de C issu des espèces en C4 (graminées) ne cesse d'augmenter dès la mise en place des prairies jusqu'à représenter 50% du carbone du sol (Fig. 4). A l'inverse, le C issu des espèces en C3 qui représente 70% du carbone du sol les premières années après déforestation, diminue rapidement durant les 2 premières décennies d'implantation des prairies. Cette tendance peut s'expliquer par le fait que le stock de C issu du C-C3 hérité de la forêt, désormais non alimenté, diminue progressivement. Cependant, à partir de 20 ans, le stock de C issu du C-C3 montre une forte augmentation probablement liée au développement plus marqué des espèces adventices (herbes ou arbustes non fourragers) et/ou des légumineuses durant cette période. De façon surprenante, la restauration de la capacité de stockage des prairies implantées en graminées fourragères de type C4 apparaît donc liée à la présence d'espèces en C3. Le décollage du stock de C total après 20 ans s'explique par une hausse du stock de C issu des

plantes en C3 cumulée à la hausse régulière du stock de C issu des graminées (C4).

Au-delà d'une quantification globale des stocks de C, chaque compartiment de la MO du sol a été caractérisé ainsi que la végétation aérienne. Contrairement à l'écosystème forestier, l'écosystème prairial accumule peu de C et de nutriments dans la biomasse végétale comparé à l'écosystème forestier (jusqu'à plus de 225 tC ha⁻¹, Hérault et al. 2013). Cumulé avec le C du sol, la forêt amazonienne reste donc l'écosystème terrestre qui stocke le plus de C dans le monde (jusqu'à 400 tC ha⁻¹). Cependant ce C est majoritairement contenu dans le compartiment végétal aérien avec un recyclage rapide des nutriments qui réduit l'accumulation de ce C dans le compartiment souterrain. La prairie est au contraire un système basé sur un recyclage des matières organiques induisant un stock important de C souterrain. Par ailleurs la majorité du C des sols étudiés est stocké sous forme récalcitrante stabilisée dans la MO que ce soit sous prairie ou sous forêt.

La dynamique d'accumulation du C du sol des prairies est un processus long qui dépend de plusieurs facteurs tels que les caractéristiques des sols (texture, composition chimique) en lien avec la stabilité du C et de l'activité microbienne (Fontaine et al. 2007). Malgré l'augmentation régulière du C issu des graminées fourragères, une partie importante des stocks en C sous prairies reste imputable à la forêt ou aux espèces adventives deux décennies après la déforestation. Les pratiques de déforestation (dessouchage mécanique) sont également un facteur qui conditionne probablement la perte en C forestier du sol. Le C du sol séquestré par la prairie s'ajoute à celui hérité de la forêt et celui issu de la décomposition des souches et racines d'arbres encore présentes. Les impacts des pratiques de mise en place des prairies sur le stockage de C restent cependant à valider.

Conclusion

Au-delà de l'effet indiscutable de la déforestation et du changement du mode d'occupation des sols sur les pertes de carbone (et sur la biodiversité), nos recherches montrent que les pâturages issus de déforestation en Guyane sont capables de retrouver un stock de C souterrain équivalent ou supérieur à celui des forêts d'origine environ 30 ans après leur mise en place. Une étude plus approfondie des espèces végétales présentes à l'échelle de la parcelle pourrait permettre de confirmer le rôle de la diversité biologique ou de certains groupes fonctionnels (les légumineuses notamment) dans la séquestration de C dans le sol. L'objectif pourrait consister à établir des indicateurs de gestion des systèmes pâturés visant le maintien d'un couvert fourrager dominant (graminées et légumineuses) apte à fournir une production animale économiquement rentable et compatible avec la présence d'autres espèces végétales mais ayant un rôle clé dans le stockage de C du sol.

Sur le plan local, le doublement prévu de la population guyanaise d'ici 2030, implique un développement endogène du territoire pour répondre aux besoins alimentaires croissants (le secteur bovin ne couvre que 20% de la consommation de viande). L'expansion en cours des systèmes d'élevage sur la forêt, doit être accompagnée par des recherches génériques au niveau de la région amazonienne sur une gestion durable des pâturages, conciliant production de fourrage et certains services environnementaux tel que le stockage de C.

Nos résultats constituent aussi une base de travail générique dans la prise en compte des stocks en C des sols pour la réalisation de bilan gaz à effet de serre des systèmes herbagers (Dolley et al. 2013, Sirder & Oulliac 2013).

Remerciements

Les auteurs remercient les éleveurs ayant accueilli notre étude (M. Crisan Araujo, M. Et Mme Bergere, M. Et Mme Burban, M. Melchiade Dolor, M. Jean Mornand Et Mme Camille Chaix, M. Maurice Porreineau Et M. Alex Rimbaud).

Nous remercions S Molinier, F Kwasié et O Ngwete pour leur appui technique.

¹ Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet CARPAGG (CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre), cofinancé par le Fonds Européen de Développement régional (FEDER PO 2007-2013) et le Cirad.

Références

- Blanfort V, Ponchant L, Dezécache C, Stahl C, Freycon V, Picon Cochard C, Huguenin J, Blanc L, Fontaine S. 2012. Dynamique du carbone dans les sols de prairies guyanaises issues de la déforestation de la forêt amazonienne : étude de chronoséquence. In : Dix-huitième Rencontres autour des recherches sur les ruminants, Paris, 5-6 décembre 2012. Paris : Institut de l'élevage.
- Cerri C.E.P, Paustian K, Bernoux M, Victoria R.L, Melillo J.M, Cerri C.C. 2004. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model, *Global Change Biology* 10 815-832.
- Deleens, E, 1976. La discrimination du ¹³C et les trois types de métabolisme des plantes. *Phy- siol. Vég.* 14, 641-656.
- Descroix L, Brunaux O, & Bezaud V. 2013. Bilan carbone et gestion forestière. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 4. 4 p.
- Dolley T, Blanfort V, Cornu G, Hérault B, Rossi V. 2013. Guyasim, un outil d'aide à la décision pour évaluer des services écosystémiques de la forêt guyanaise. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 3, 4 p.
- Sirder H, & Oulliac B. 2013. Vers un observatoire guyanais en du carbone et des gaz à effet de serre (GES). In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 1, 4 p.
- Fontaine S, Barot S, Barre P, Bdioui N, Mary B, Rumpel C. 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, v. 450, p. 277-280.
- Hérault B, Freycon V, & Molto Q. 2013. Stocks de C dans les forêts tropicales humides. Forêts naturelles & Reconstitutions post-exploitation. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 3, 4 p.
- De Moraes Sa J.F.L, Neill C, Volkoff B, Cerri C.C, Melillo J, Costa Lima V, Steudler P.A. 2002. Soil carbon and nitrogen stocks following forest conversion to pasture in the Western Amazon Basin. *Acta Scientiarum*, v. 24, n. 5, p. 1369-1376.
- Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, & De Haan C. 2006. *Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options*. Rome, FAO, 390 p. Steinfeld H, Mooney H.A, Schneider F, & Neville L.E, eds.

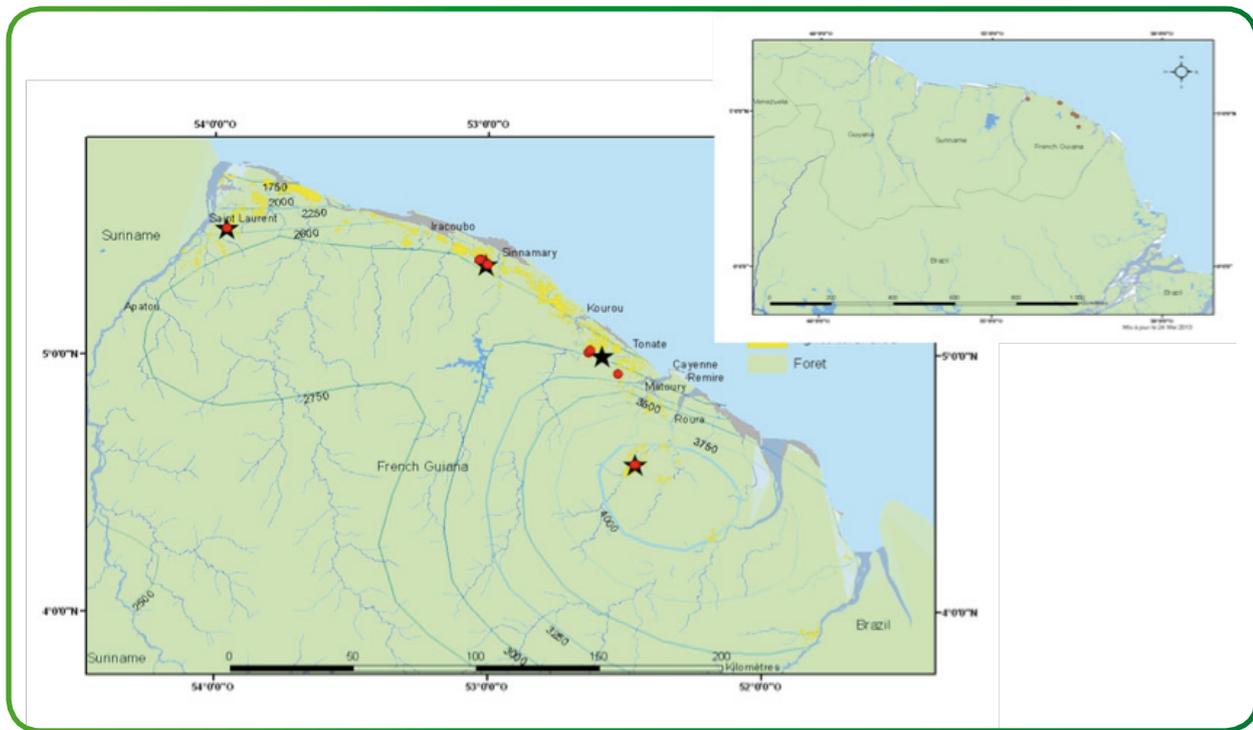


Figure 1. Notre étude se déroule sur 24 prairies âgées de 6 mois à 36 ans issues de déforestation et de 4 sites de forêt témoins répartis sur les zones agricoles concentrées sur une mince bande de terre.



Figure 2. La filière bovine guyanaise repose sur des systèmes herbagers plutôt de type semi-extensif (chargement moyen d'environ 1 vache/ha) où la graminée *Brachiaria humidicola* constitue l'espèce fourragère dominante. (Photo V Blanfort)

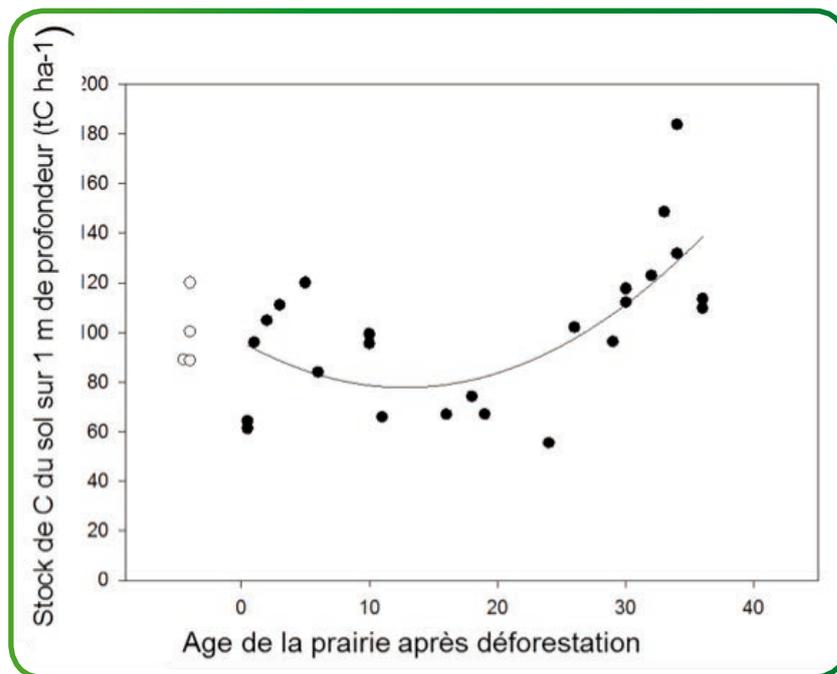


Figure 3. Modèle de régression de l'évolution des stocks en C des sols des prairies à 1 m de profondeur le long d'une chrono séquence composée de 24 prairies de 6 mois à 36 ans issues de déforestation. En blanc le stock des 4 forêts témoins.

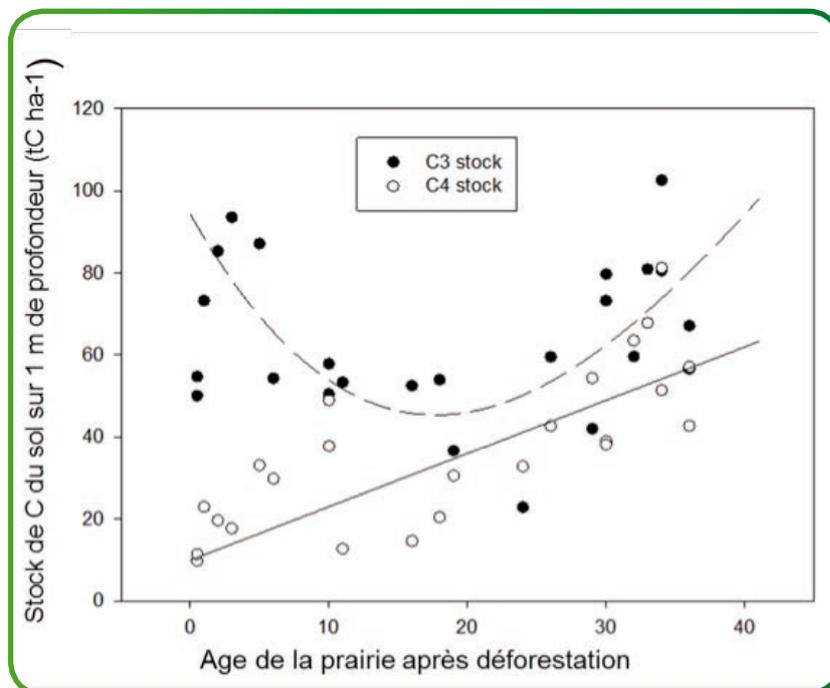


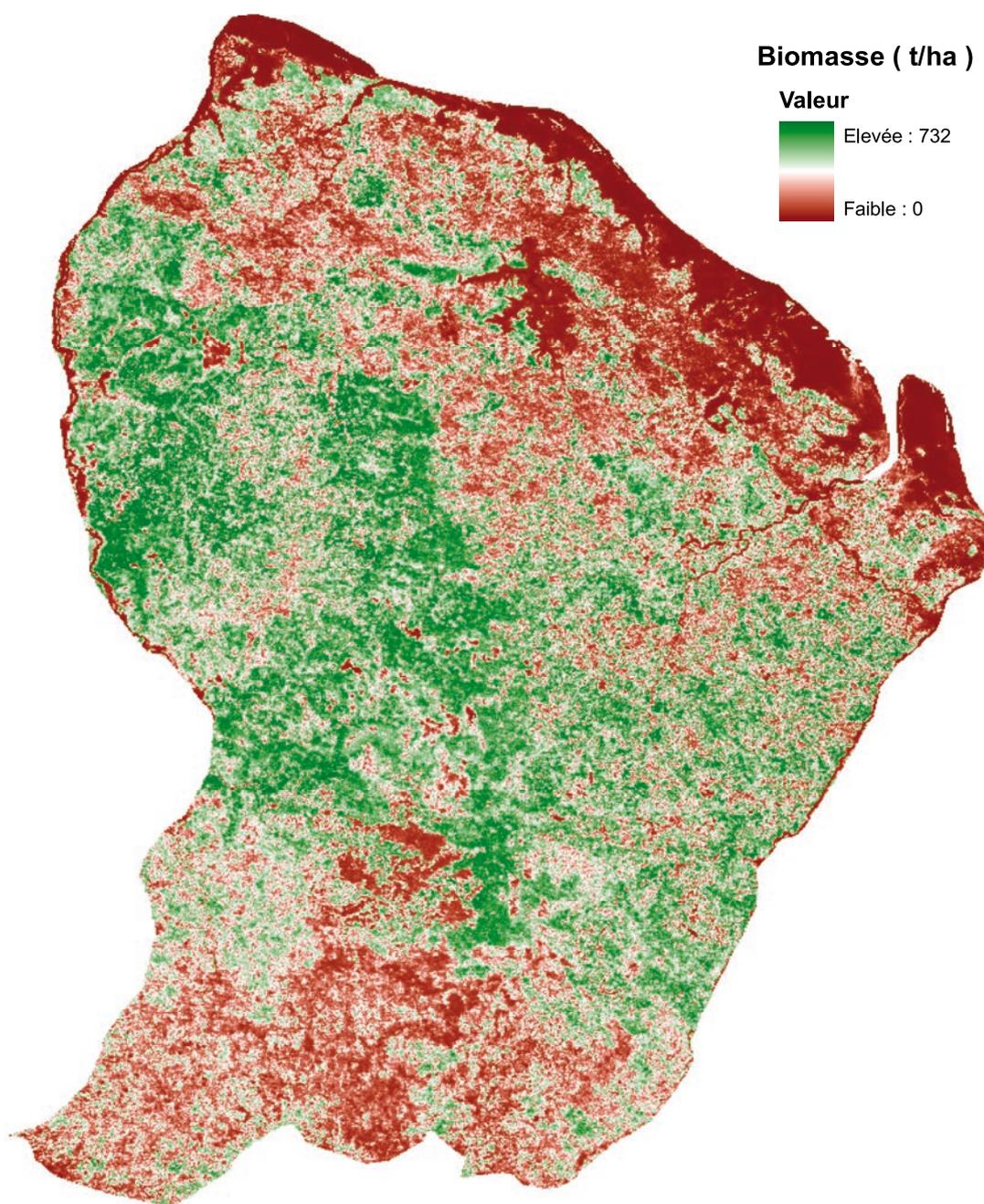
Figure 4. Le C issu des plantes en C3 (arbres forêt, légumineuses et adventices) représente en moyenne 72.5 % du C pour les prairies de moins de 20 ans. De 20 à 36 ans, il est de 55.1 %.

Le C issu des plantes en C4 (graminées) augmente de façon régulière, pour atteindre environ la moitié du stock des anciennes prairies.

SESSION 4.

Vers la réalisation de bilans carbone
et gaz à effet de serre

Estimation de la biomasse forestière Guyanaise parue dans Nature



Les références établies sur les flux et les stocks peuvent être mobilisés pour la réalisation de bilans Carbone et gaz à effet de serre (GES) à travers divers outils.
Exemple de la carte d'estimation de de biomasse de la forêt Guyanais, logiciel Guyasim (Molto).

Actions de l'ADEME en termes de bilan gaz à effet de serre : outils et méthodes pour l'agriculture et la forêt

FEIX I¹

¹ Expert national « sol », ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), Direction Productions et Energies Durables, 20 Avenue du Grésillé - BP 90406 - 49004 Angers cedex 01, mél : isabelle.feix@ademe.fr

Introduction

La France s'est fixé un objectif ambitieux : diviser par 4 ses émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2050 par rapport à 1990. En 2010, le secteur agricole et sylvicole était le deuxième plus gros émetteur, derrière les transports intérieurs (hors UTCATF¹). Le secteur agricole peut même représenter jusqu'à 50 % des émissions de GES d'un territoire. Ces émissions correspondent majoritairement à des mécanismes biologiques diffus et s'avèrent difficiles à mesurer. Il importe également de prendre en compte d'autres spécificités des secteurs agricoles et forestiers, telles que leur capacité à stocker le carbone (C).

Concernant le secteur UTCATF, seule la comptabilisation des absorptions et émissions de GES liées au boisement, au déboisement et au reboisement était obligatoire pendant la première période d'engagement du protocole de Kyoto. Les nouvelles règles comptables pour ce secteur, adoptées par l'Union européenne pour la deuxième période d'engagement², rendent dorénavant obligatoire aussi la comptabilisation des absorptions et émissions de GES liées à la gestion forestière, ainsi qu'à la gestion des terres cultivées et des pâturages. Cette décision renforce l'importance des bilans GES des secteurs agricoles et forestiers.

En charge du développement des énergies renouvelables, des biomatériaux et des questions sur le changement climatique, l'ADEME contribue au respect des engagements pris par la France, dans le cadre du Protocole de Kyoto et elle agit en direction de tous les acteurs concernés par la lutte contre le changement climatique. Cet article fait le point des actions de l'ADEME en termes d'outils et de méthodes de bilans GES en relation avec l'agriculture et la forêt.

1. Outils de bilans GES

Les outils d'aide à la décision de bilans GES, ou intégrant des bilans GES, mis au point et/ou utilisés par l'ADEME, se déclinent à plusieurs échelles :

- Le bilan Carbone®³ développé aux échelles de l'entreprise et du territoire ;
- L'Analyse de Cycle de Vie (ACV), comprenant un bilan GES, développé pour comparer ou écoconcevoir des produits.

Ces outils prennent néanmoins mal en compte le C biogénique (biomasse vivante et morte, matière organique des sols) et donc l'agriculture et la forêt. C'est pourquoi l'ADEME a développé trois outils complémentaires :

- Dia'terre®⁴ à l'échelle de l'exploitation agricole ;
- CLIMAGRI®⁵ à l'échelle du territoire ;
- AGRIBALYSE®⁶ à l'échelle du produit agricole.

Dia'terre® est un outil de diagnostic énergie - GES des exploitations agricoles. Il est destiné aux conseillers agricoles et il a pour objectif de réaliser un diagnostic en vue de mettre en place un plan d'actions. Pour sa mise au point, l'ADEME s'est associée au ministère en charge de l'agriculture et à de nombreux partenaires du monde agricole (instituts techniques, APCA, ACTA, FNCUMA, FNCIVAM, SOLAGRO, INRA et AgroSupDijon). Dia'terre® comprend un logiciel de diagnostic énergie - GES et une base de données centralisée des diagnostics, ainsi qu'un module de restitution statistique, pour élaborer des références par type d'exploitation et/ou zone géographique sur la base de données globales. Il comprend également des documents de méthode (guides) et des fiches action disponibles pour l'utilisateur, un dispositif de formation des auditeurs, un didacticiel et un

espace d'échanges pour les utilisateurs (« foire aux questions »). CLIMAGRI® est également un outil de diagnostic énergie - GES pour l'agriculture, mais aussi la forêt, à l'échelle des territoires. Cet outil permet de réaliser un bilan territorial chiffré, pour comprendre les enjeux agricoles et forestiers du territoire, identifier les priorités d'action, en fonction des leviers d'action disponibles, et à différentes échelles de temps et, enfin, réaliser des simulations d'action. CLIMAGRI® permet de réunir les partenaires d'un territoire (responsables locaux, élus, représentants des milieux agricoles et forestiers, experts) autour des enjeux énergie et GES afin d'élaborer des stratégies locales pour l'agriculture et la forêt. Il se veut être le volet agricole et forestier du Schéma Régional Climat Air Énergie (SRCAE) et du Plan Climat Énergie Territorial (PCET). Développé pour la Métropole, il a été ensuite adapté à la Guadeloupe.

AGRIBALYSE®, quant à lui, est une base de données d'inventaire de cycle de vie (ICV) des produits agricoles. Il a été développé grâce à un partenariat entre l'ADEME et de nombreux partenaires du monde agricole (instituts techniques, INRA, ART, CIRAD, ACTA). Il a pour objectif de fournir des informations sur les impacts environnementaux, dont les impacts en termes d'émissions de GES, des filières de production, selon une méthode reconnue (ISO 14040, ILCD), pour hiérarchiser les actions, favoriser l'écoconception et communiquer vers les consommateurs (affichage environnemental). Les productions concernées sont les principales productions françaises. Elles sont analysées en « sorties de ferme » (ni transformation, ni distribution). Aucune nouvelle ACV n'est produite dans le cadre d'AGRIBALYSE®. En revanche, un cadre méthodologique homogène a été défini, notamment en termes de choix des modèles de calculs des flux, et des impacts, et de contrôle de la qualité des données collectées. Lors de la première phase, qui s'achève, une vingtaine de produits végétaux, dont trois produits tropicaux et une vingtaine de produits animaux ont été étudiées.

2. Surveillance et recherche

Afin d'alimenter et d'améliorer les outils de bilan GES des filières et produits agricoles et forestiers, en termes de données et de modèles, l'ADEME soutient la recherche et la surveillance, notamment via :

- Le GIS « Sol »⁷, dont l'objectif est de constituer et gérer un système d'information sur les sols français. Il comprend plusieurs programmes d'inventaires, de cartographie et de surveillance, réunis dans des bases de données et des systèmes d'informations géographiques. Deux bases de données sont particulièrement intéressantes du point de vue du suivi de l'évolution des stocks de C dans les sols : la Base de Données d'Analyses de Terres (BDAT) et le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) (Fig. 1, 2). Notons que la première campagne du RMQS doit débuter fin 2013 en Guyane.
- Le Réseau National de suivi à long terme des Écosystèmes FOREstiers (RENECOFOR), géré par l'ONF. La comparaison entre les deux campagnes de mesures permet de suivre l'évolution des stocks de C des sols forestiers métropolitains.
- Plusieurs programmes de recherche, dont Réactif (REcherche sur l'Atténuation du Changement Climatique par l'agriculture et la Forêt)⁸. 15 projets ont été retenus sur 2012-2013 et le 2ème appel à projets est en cours de sélection.
- Des thèses, dont une dizaine concerne les liens entre le changement climatique et l'agriculture ou la forêt.

3. Actions d'accompagnement des outils de bilan GES

En accompagnement des outils de bilans GES, l'ADEME participe aussi à la normalisation (ex : AFNOR BP X30-323, ISO 14068 et ISO 14069), ainsi qu'aux travaux de l'Agence Internationale de l'Énergie (notamment pour mieux quantifier le bilan GES du bois énergie : tâche 38- GHG Balances of Biomass and Bioenergy Systems). Elle communique (site Web⁹, journées techniques, colloques, brochures), organise des sessions de formation (par ex. pour CLIMAGRI® et Dia'terre®), anime des réseaux (par ex. autour des deux outils, dans le cadre de PCET et du SRCAE) et héberge la base de données C¹⁰.

4. Réflexions internes sur la prise en compte du carbone biogénique dans les méthodes de bilan GES

En 2011, l'ADEME s'est interrogée sur la prise en compte du C biogénique dans les différents outils et méthodes de bilan GES (normes, méthodes réglementaires, ACV...) qu'elle promeut (ADEME 2012). Sur la question spécifique de la filière forêt-bois, cette expertise collective interne a été complétée par un stage (Buitrago 2012). Dans les deux cas, les revues de la littérature scientifique montrent que la biomasse forestière peut contribuer à l'atténuation du changement climatique de trois façons :

- substitution du C fossile, qu'il s'agisse de substitution d'énergie fossile ou de matériaux énergivores (ex : bois-combustion, bois-construction) ;
- conservation de stocks de C plus ou moins importants (ex : forêts primaires, tourbières, bois matériau) ;
- séquestration du C atmosphérique (ex : reforestation, afforestation).

Les conclusions de ces travaux sont au nombre de quatre :

- Il est indispensable de comptabiliser tous les flux¹¹ et tous les stocks¹² lorsqu'on fait un bilan GES de la filière forêt-bois (Fig. 3).
- La séquestration et la conservation sont a priori plus intéressantes si on veut rapidement diminuer les émissions de GES... mais elles sont également plus risquées au regard du changement climatique à venir et de l'amplification des événements extrêmes (sécheresse, incendies, tempêtes, parasites, maladies...).
- La substitution devient généralement plus intéressante à moyen ou long terme, et d'autant plus qu'on favorise l'effet « cascade »¹³.
- Il n'existe pas de règle simple pour arbitrer, du point de vue CO₂/climat, la compétition substitution versus conservation ou séquestration au niveau national ; l'arbitrage dépendant de l'horizon temporel considéré (Fig. 4) et de nombreux paramètres environnementaux¹⁴ et techniques¹⁵.

Conclusion

Suite à ses réflexions internes et à l'évolution du contexte, l'ADEME va renforcer ses travaux de recherche (suites de Réactif, projet de GIS sur les changements d'affectation des sols...) et de surveillance (lancement de la deuxième campagne du RMQS). Elle prévoit de publier un avis sur l'état des connaissances sur le bilan GES de la filière forêt-bois et d'engager des travaux d'amélioration méthodologique afin d'intégrer le carbone biogénique dans les bilans GES des ACV de la filière bois-énergie. En termes d'outils, l'ADEME souhaite faire évoluer son mode d'intervention sur AGRIBALYSE® en l'orientant dorénavant sur l'accompagnement des partenaires souhaitant faire des ACV sur les produits agricoles et sur l'enrichissement de la base de données C. Elle s'interroge aussi sur les adaptations de l'outil Dia'terre® (et à terme de CLIMAGRI®) qui seraient nécessaires pour une utilisation de l'outil dans les DOM. Elle souhaite enfin pousser les réflexions C dans les systèmes de certification bois en vue d'intégrer à moyen terme, un indicateur C dans les critères de durabilité, et améliorer la traçabilité des flux de biomasse sur l'ensemble de la chaîne (afin d'estimer notamment les bilans GES liés aux approvisionnements des unités de bois-énergie, y compris le bois importé).

Références

ADEME, 2012. Rapport Final du Groupe de Travail Carbone Biogénique. Rapport interne. 200 p.
Buitrago M. 2012. Évaluation des stratégies forestières d'atténuation du changement climatique en France métropolitaine. Mémoire de fin d'études M2 Dynamiques Territoriales & Paysages / Paysages et Médiation. AgroCampus Ouest, Université d'Angers, ADEME. 100 p.
GIS Sol, 2011. L'état des sols de France. 188 p.

¹ Utilisation des Terres et Changement d'Affectation des Terres et Forêt.

² Décision prise suite à la conférence sur le climat de Durban : Décision No 529/2013/EU publié le 18 juin 2013.

³ Historiquement développée par l'ADEME, la méthode est aujourd'hui développée et diffusée par l'Association Bilan Carbone : <http://www.associationbilancarbone.fr/>

⁴ <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=24390/>

⁵ <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=24979/>

⁶ <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=25508/>

⁷ Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, réunissant l'INRA, l'ADEME, l'IGN, l'IRD, les ministères en charge de l'écologie et de l'agriculture. www.gissol.fr

⁸ <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=80862&p1=1> et <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=87358&p1=1>

⁹ <http://www.bilans-ges.ademe.fr/>

¹⁰ <http://www.basecarbone.fr/>

¹¹ Émissions de CO₂ fossile lors de l'abattage et dans la chaîne de production, émissions de GES lors de la combustion du bois ou de la dégradation des produits en fin de vie, économie de CO₂ fossile permise par la substitution, captage du CO₂ atmosphérique.

¹² Sol, biomasse végétale, litière, bois matériau...

¹³ I.e. : utiliser en priorité le bois pour les matériaux, notamment dans des produits à longue durée de vie et/ou remplaçant des matériaux énergivores, puis utiliser les déchets et sous-produits issus de la gestion forestière et de la transformation, ainsi que les produits en fin de vie, pour produire de l'énergie.

¹⁴ Zone climatique, effets du changement climatique et de l'amplification des événements extrêmes, nature des sols et de la végétation.

¹⁵ Gestion forestière, matières premières utilisées pour les filières bois, efficacité énergétique des transports et des technologies utilisées (séchage, granulation, conversion énergétique...), énergie fossile / mix énergétique substitué, longueur de vie des matériaux bois, intensité énergétique des matériaux substitués.

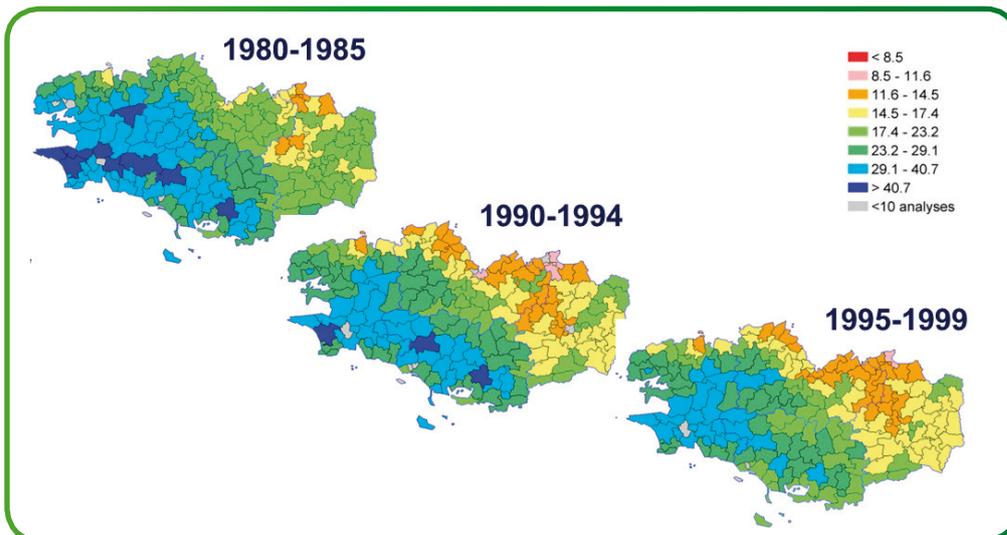


Figure 1. Un exemple d'outil utile pour les bilans GES : la Base de Données d'Analyses de Terre. Exemple d'évolution des teneurs médianes cantonales en carbone organique (%) en Bretagne (GIS SOL). Sur cette carte, on peut voir l'évolution des teneurs en carbone organique dans les sols entre les trois campagnes de la BDAT et notamment leur baisse dans le sud de la Bretagne où les teneurs initiales en carbone organique étaient hautes.

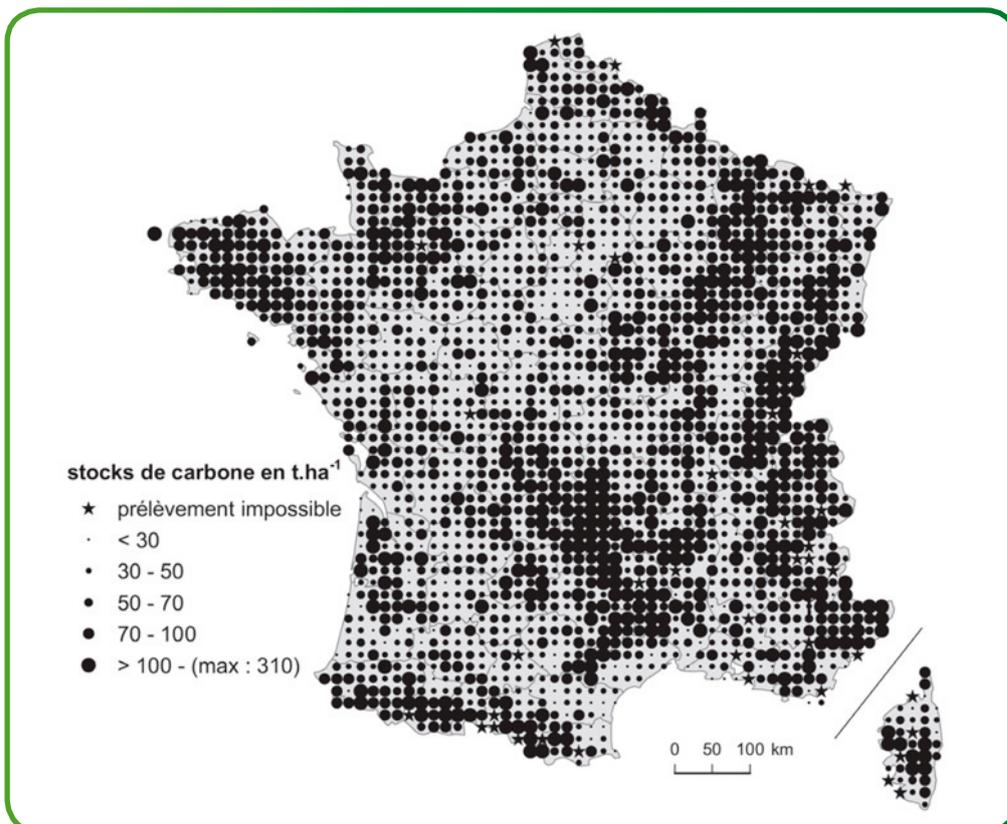


Figure 2. Stocks de carbone organique dans l'horizon 0-30cm des sols ($t\ ha^{-1}$) en France métropolitaine (GIS SOL, RMQS, 2010).

Sur cette carte, on peut voir l'effet combiné du type de sol, du climat et de l'occupation des sols sur les stocks de carbone dans les sols métropolitains. Ainsi, on observe des stocks faibles en Languedoc-Roussillon, où la viticulture est développée sur des sols peu épais, sous climat méditerranéen et, au nord de la France dans les zones de cultures intensives. A l'inverse, on note des stocks importants dans les zones de prairies et/ou de montagnes, dans les zones humides ou dans les sols volcaniques du Massif central.

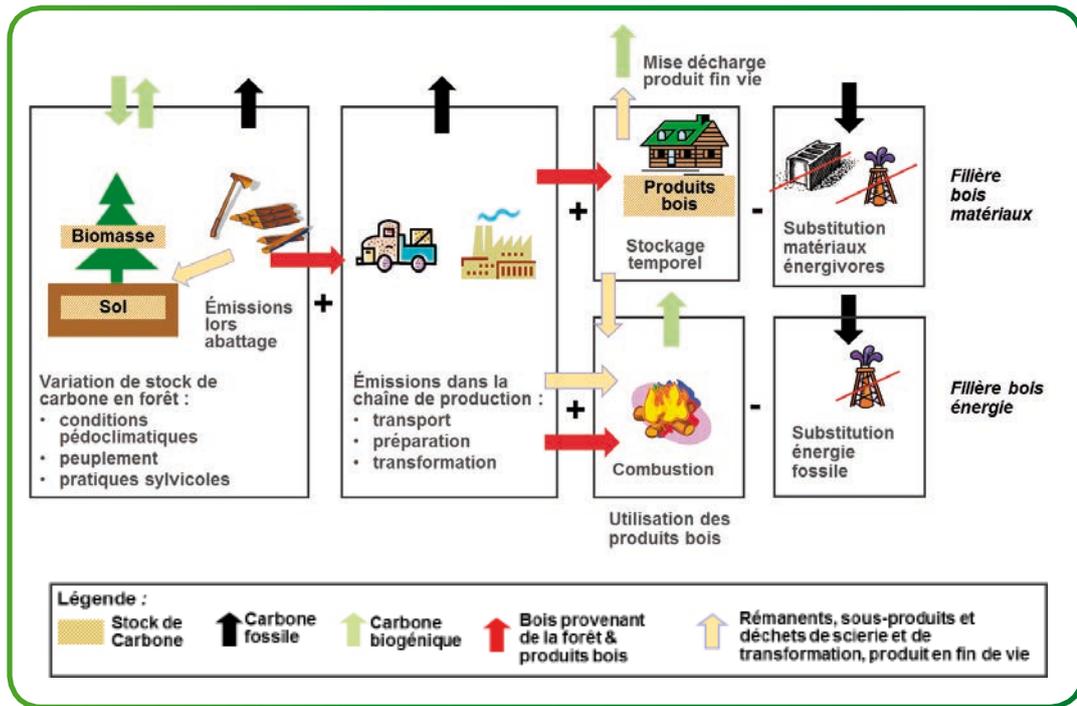


Figure 3. Bilan GES de la filière forêt – bois (d'après Buitrago 2012).
 NB : il conviendrait de rajouter le cycle de l'azote (notamment le N₂O qui est un GES).

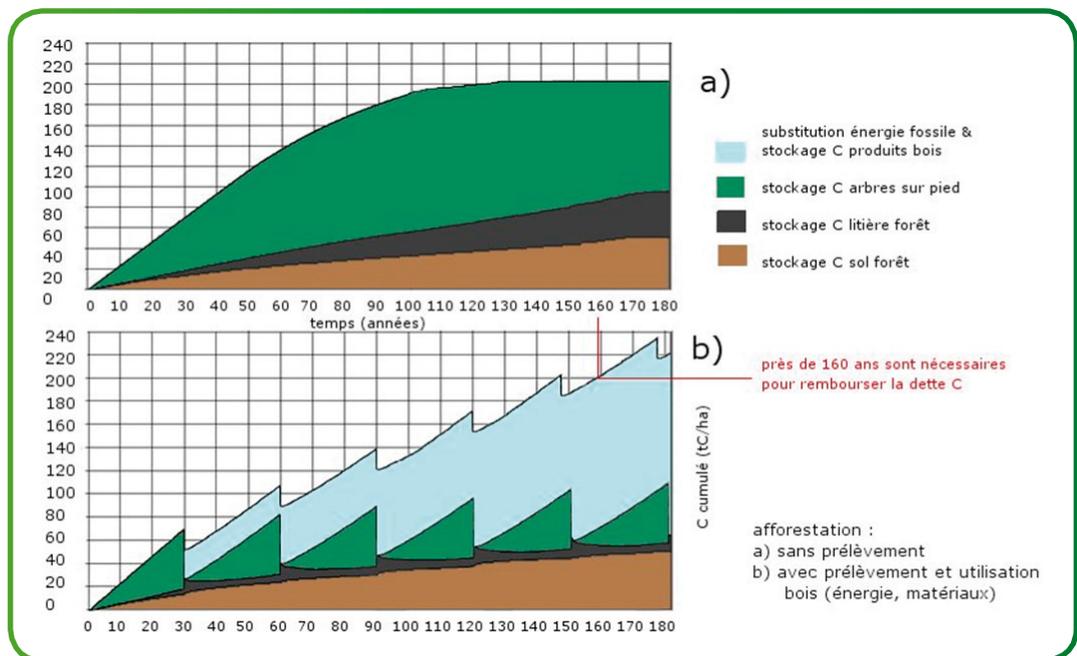


Figure 4. Séquestration du carbone dans le sol, la litière et les arbres pour un projet d'afforestation (Fig. 3a) & séquestration du carbone dans le sol, la litière, les arbres et énergie fossile évitée pour une plantation à vocation de bois-énergie et bois-matériau (Fig. 3b).

On note, dans ce cas virtuel d'afforestation : (i) que le stock de carbone dans l'écosystème forestier (arbres, sol, litière) est moins important dans la forêt exploitée ; (ii) l'importance de l'horizon temporel considéré (le stockage de carbone dans les produits bois et les substitutions d'énergie fossile permises par le bois-énergie et le bois-matériau, s'accumulant dans le temps, finissent par compenser le stock inférieur dans l'écosystème, ici au bout de 160 ans, et le bilan GES de la forêt exploitée devient plus intéressant au-delà).

D'après : Marland G., Schlamadinger B., 1997. Forests for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis. *Biomass and Bioenergy*, 13, p. 389-397.

Guyasim, un outil d'aide à la décision pour évaluer des services écosystémiques de la forêt guyanaise

DOLLEY T¹, BLANFORT V², CORNU G¹, HERAULT B³, ROSSI V³

¹ CIRAD UMR EcoFoG Bâtiment D TA C-105 / D Campus international de Baillarguet 34398 Montpellier Cedex 5

² CIRAD, UMR SELMET «Tropical and Mediterranean livestock farming», Campus International de Baillarguet 34398 Montpellier Cedex 5

³ CIRAD, UMR EcoFoG «Ecology of Guiana Forests» Campus agronomique, Avenue de France - BP 701 97387 Kourou CEDEX France

Introduction

La Guyane est une des régions de l'Union Européenne ayant la plus importante croissance démographique et économique. Ce développement rapide conduira les décideurs guyanais à faire des choix déterminants sur l'aménagement de leur territoire dans les années à venir. Une partie de ces aménagements se feront dans des espaces forestiers, car ils recouvrent plus de 80% du territoire. Or la forêt tropicale est un des éléments essentiels dans la stratégie mondiale d'atténuation du réchauffement climatique. Elle régule les émissions de CO₂ en stockant le carbone atmosphérique. Pour la gouvernance de leur territoire, les décideurs guyanais devront donc conjuguer deux objectifs a priori antagonistes : développer leur territoire en aménageant la forêt et préserver ses services environnementaux. Il est donc fondamental de trouver un bon compromis entre ces deux objectifs. D'autant plus que de grands chantiers d'aménagement du territoire sont prévisibles étant donné le contexte socio-économique de la Guyane. L'objectif principal du projet est d'aider les décideurs à trouver le meilleur compromis en leur fournissant un «simulateur pour explorer l'impact environnemental des scénarios de développement de la Guyane».

1. Mise en œuvre et résultats

Pour réaliser ce projet, nous avons regroupé les travaux à réaliser en quatre activités complémentaires. La première activité consiste à spatialiser des services éco-systémiques à l'échelle de la forêt guyanaise. Nous extrapolons les évaluations de ces services de la parcelle à la forêt grâce aux habitats décrits par l'ONF dans le projet «habitat» (Guitet et al. 2013). La seconde activité consiste à établir des scénarios de développement socio-économiques en partenariat avec les acteurs impliqués dans l'aménagement de la Guyane. La troisième activité consiste à modéliser l'impact des scénarios de changements climatiques sur les services éco systémiques. Enfin la quatrième activité consiste à réaliser un logiciel de simulation intégrant les résultats et connaissances des trois autres activités.

1.1 Estimation du stock de carbone

L'estimation du stock de carbone à l'échelle de la Guyane a été réalisée à partir d'extrapolations spatiales d'estimation de stock de carbone de parcelles d'inventaires forestiers. Ce stock est estimé en sommant les estimations de biomasse de tous les arbres de la parcelle ayant un diamètre supérieur à 10 cm à 1.3 m de hauteur. La biomasse d'un arbre est estimée à partir de la connaissance de son diamètre par un modèle que nous avons construit à partir des données de masses d'arbres issues du projet ECEREX (Lescure 1983).

L'incertitude de ces estimations successives pour obtenir la biomasse aérienne des parcelles inventoriées a été modélisée par un modèle bayésien hiérarchique (Molto et al. 2013). Ce modèle a également permis de déterminer et classer par ordre d'importance les sources de cette incertitude. En particulier, il est ressorti que le niveau de connaissance sur la densité du bois des espèces n'avait pas beaucoup d'influence. Ce résultat est important pour la spatialisation des estimations de biomasse car il aurait été difficile d'obtenir cette information pour toutes les espèces. Dans la pratique, utiliser une densité de bois moyenne pour toutes les espèces n'affecte pas beaucoup les estimations de biomasse. Cependant, il est important que la valeur utilisée comme densité de bois moyenne soit cohérente avec la composition spécifique.

La spatialisation des estimations, par extrapolation en s'appuyant sur des variables environnementales et climatiques a permis d'obtenir une première carte de la biomasse aérienne

de la Guyane. Cette carte ne présente pas, a priori, de biais d'estimation contrairement aux cartes produites jusqu'à présent à partir de données satellitaires qui sous estiment les valeurs de biomasses supérieures à 400 tonnes à l'hectare. Par ailleurs, comme nous avons développé une méthodologie permettant la propagation des incertitudes, lors du changement d'échelle, dans les estimations de biomasse, nous avons également calculé une carte des écart-types associés. Cette dernière carte permet de déterminer les intervalles de confiance associés aux estimations de stocks de carbone.

1.2 Données relatives au Carbone stocké dans le sol en Guyane

Nous avons construit un modèle dans lequel le carbone du sol est estimé à 96 tonnes par hectares en forêt.

Cette estimation est en phase avec la fourchette de valeurs donnée dans l'expertise (Guitet et al. 2005).

La dynamique d'évolution du stock de carbone dans le sol lors du changement d'occupation du sol « Forêt->Pâturage » a été étudiée dans le projet CARPAGG (Carbone des Pâturages de Guyane et Gaz à effet de serre, Stahl et al. 2013, Blanfort et al. 2013)

Le modèle suivant est tiré d'une étude sur la dynamique du carbone dans le temps dans les sols de prairies de différents âges issues de la déforestation de la forêt amazonienne :

$$C = 0.11 * \text{age}^2 - 2.89 * \text{age} + 96.36 \quad (C = \text{stock de carbone en t ha}^{-1})$$

Ce modèle est implémenté dans le logiciel Guyasim.

1.3 Scénario de développement de la Guyane

Les scénarios prospectifs d'occupation de l'espace ont été construits en croisant les aménagements planifiés et les aménagements spontanés. Les éléments les plus influents sont les tendances observées pour l'accroissement démographique des communes.

Afin de localiser les surfaces d'extensions urbaines et agricoles prévues et leurs échéances, nous avons compilé les documents d'aménagement disponibles des communes de la région.

Parallèlement, afin d'évaluer les dynamiques territoriales spontanées, nous avons analysé les évolutions d'occupation des sols sur les cartes réalisées par l'ONF concernant la frange littorale de la Guyane pour les années 2001, 2005, 2008 et 2011. La forte augmentation de la population génère, surtout dans l'ouest, une dynamique spontanée de mitage des forêts le long des axes routiers. Pour prendre en compte ce phénomène de mitage de façon réaliste dans le logiciel, nous avons relié l'intensité du mitage autour de routes à la croissance de la population dans les agglomérations voisines. Le croisement de ces deux sources d'information, nous a permis d'obtenir trois cartes, correspondantes à trois hypothèses de développement (haute, moyenne et basse) et représentant l'occupation des sols sur le littoral guyanais en 2022 et 2032. Les scénarios de développement socio-économiques et leurs méthodes de construction sont détaillés dans un rapport de synthèse.

1.4 Scénario de réchauffement climatique

Actuellement, les scénarios climatiques globaux RCP remplacent les «SRES scenarios» (Special Report on Emissions Scenarios) établis en 2000. Ces scénarios se basent sur le forçage radiatif. Le forçage radiatif peut être défini comme «l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère». Le scénario le plus probable est le RCP 4.5. Dans ce scénario, en 2100, le forçage radiatif atteint 4,5 W/m², ce qui correspond à une concentration équivalente en CO₂ autour de 650 ppm (contre 390 ppm actuellement). La stabilisation se fait après 2100, mais commence vers 2060.

Nous avons collaboré avec les membres du projet CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, <http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr>) pour obtenir des descentes d'échelle à la zone de la Guyane du scénario global. Nous avons ainsi pu obtenir des prédictions pour la pluviométrie, la température et l'évaporation. Les cartes des prévisions pour ces trois variables sont présentées et expliquées dans le logiciel.

1.5 Scénario d'aménagement

Le logiciel permet de modéliser 2 types de scénarios : un scénario d'aménagement forestier (Fig. 1, Fig. 2) et un scénario d'aménagement du territoire (Fig. 3, Fig. 4). Un scénario d'aménagement forestier permet de préciser quelles zones géographiques sont exploitées et d'estimer la reconstitution de la biomasse après exploitation. Un scénario d'aménagement du territoire permet de préciser quelles zones géographiques vont être aménagées (l'occupation du sol de ces zones va être modifiée) et d'estimer l'évolution du stock de carbone si celui-ci est connu et d'avertir en cas d'impact connu sur la biodiversité. Des copies d'écran sont disponibles en annexes pour illustrer le fonctionnement du logiciel.

2. Perspectives

Le principal produit de ce projet est un outil d'aide à la décision pour l'aménagement du territoire guyanais. Ce logiciel permet d'explorer de façon interactive les conséquences de différentes décisions d'aménagement sur les services des écosystèmes forestiers. Des cartes à l'échelle de la Guyane sont présentées pour fournir une vision synthétique. Cet outil facilite la mise en œuvre des politiques d'aménagement du territoire en justifiant les choix par une approche objective et quantifiée.

A travers ce projet, les résultats à la pointe de la recherche sont transférés aux décideurs dans un format adéquat et adapté à leur échelle de travail. Dans le même temps, les connaissances sur le fonctionnement des forêts tropicales seront approfondies. Cet outil sera également particulièrement important pour les collectivités locales (Aménagement Régional, etc.) dans le contexte international actuel de négociations pour lutter contre les dégradations des milieux naturels et notamment des forêts tropicales. Dans le cadre de la mise en place des mécanismes REDD+, en écho aux conclusions du rapport « millenium assessment » de l'ONU, un paiement devrait être attribué pour les services rendus par les écosystèmes. Le logiciel permettra de quantifier des services rendus par les écosystèmes forestiers et leurs évolutions dans le temps. Il fournira ainsi des éléments tangibles pour négocier une éventuelle rétribution de la Guyane.

Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil régional de Guyane, l'ONF, l'UMR EcoFoG, l'UR UR B&SEF, l'UMR SELMET et l'UMR AMAP pour leur participation au projet. Les auteurs remercient aussi les différents intervenants rencontrés lors de ce projet.

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet GUYASIM, cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER PO 2007-2013) et le Cirad.

Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec le projet CARPAGG (CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre), cofinancé par les Fonds européens de développement régionaux (FEDER PO 2007-2013) et le Cirad.

Le projet Guyasim s'est appuyé sur les travaux suivants :

Réseau GUYAFOR, Inventaires papetiers, Dispositif GuyaFLux, Projet AMALIN, Projet BRIDGE, Projet ECEREX, Projet Habitat, Données IGN, Projet CARPAGG.

Références

Baraloto C, Paine C.E.T, Patino S, Bonal D, Herault B & Chave J 2010. Functional trait variation and sampling strategies in species-rich plant communities. *Functional Ecology*, 24, p. 208-216 (->Projet Bridge).
Baraloto C, Rabaud S, Molto Q, Blanc L, Fortunel C, Herault B, Davila 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, 2677-2688 (Projet AMALIN).

Blanfort V, Ponchant L, Dézécache C, Stahl C, Freycon V, Picon-Cochard C, Blanc L, & Fontaine S. 2013. Dynamique du carbone dans les sols de prairies issues de la déforestation de la forêt guyanaise. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 3. 4 p. (Projet CARPAGG).

Bonal D, Bosc, A., Ponton, S., Goret, J.Y, Burban B, Gross P, Bonnefond, J.M., Elbers J, Longdoz B, Epron D, Guehl J.M, and Granier A. 2008. Impact of severe dry season on net ecosystem exchange in the Neotropical rainforest of French Guiana. *Global Change Biology*, 14: 1917–1933 (Dispositif GuyaFLux).

Guitet S, Blanc L, Chave J, Gomis A. 2005. Expertise sur les références dendrométriques nécessaires au renseignement de l'inventaire national de gaz à effet de serre pour la forêt guyanaise. Guitet S, Cornu J.F, Brunaux O, Betbeder J, Carozza J.M, Richard-Hansen C. 2013. Landform and landscape mapping, French Guiana (South America). *Journal of Maps*, 2013, p. 1-11, doi: 10.1080/17445647.2013.785371 (-> Projet Habitat).

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 (Projet ECEREX).

Molto Q, Rossi V, Blanc L. 2013. Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 4, p. 175–183. doi: 10.1111/j.2041-210x.2012.00266.x.

Stahl C, Klumpp K, Falcimagne R, Picon-Cochard C & BLANFORT V 2013. Flux de C échangés entre l'écosystème prairial et l'atmosphère en Amazonie française. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 2. 4 p (Projet CARPAGG)

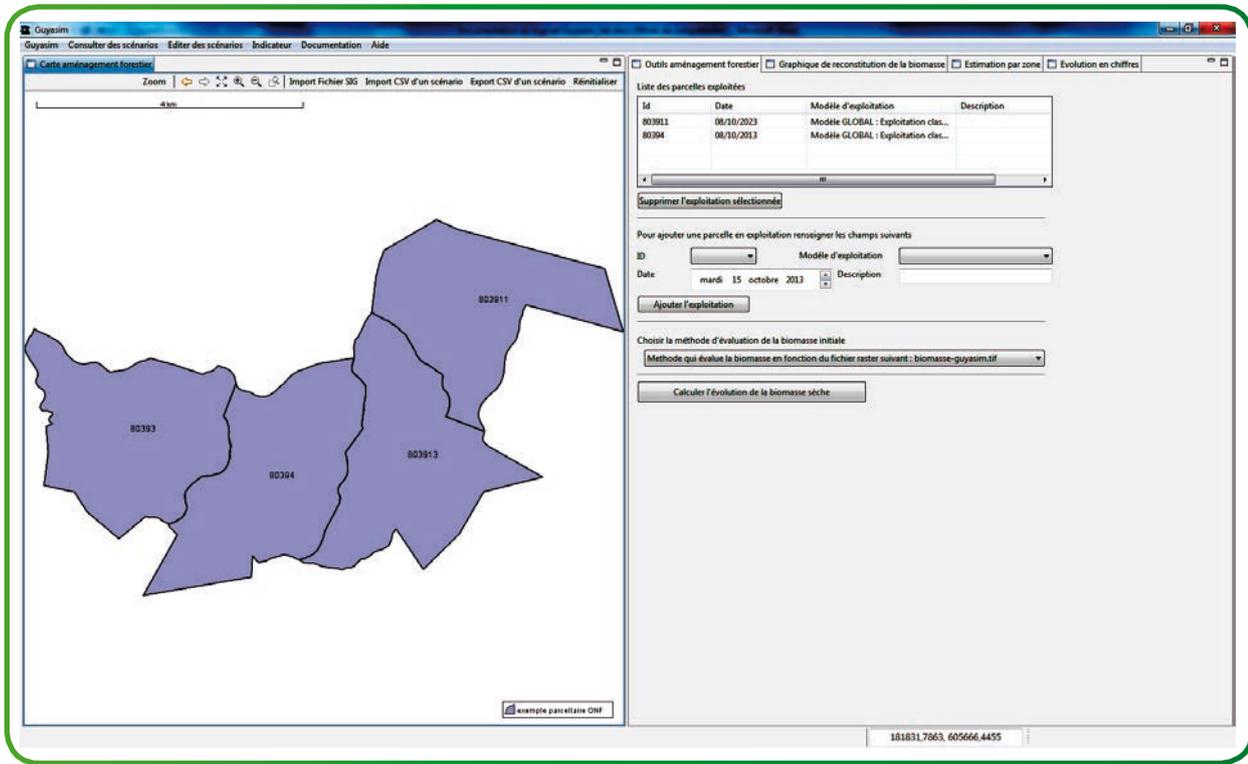


Figure 1. Fenêtre de définition d'un scénario d'aménagement forestier.

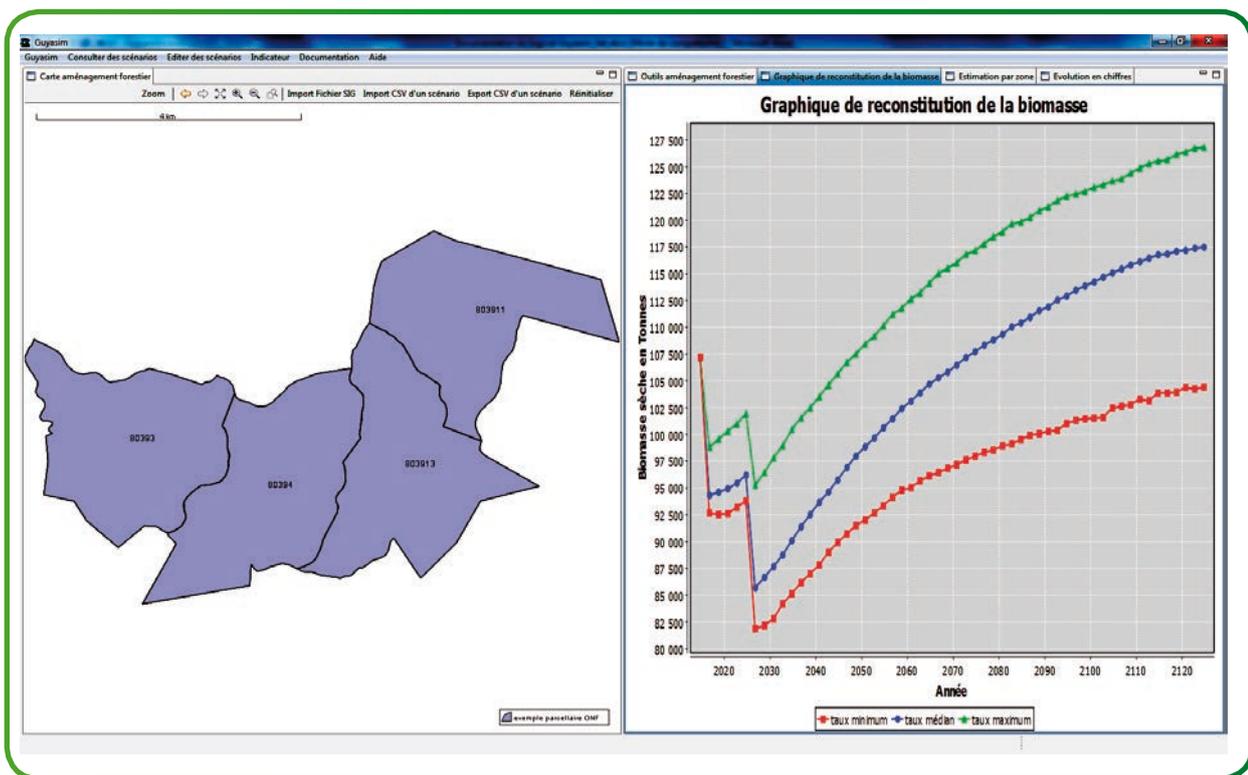


Figure 2. Graphique de reconstitution de la biomasse en fonction des années.

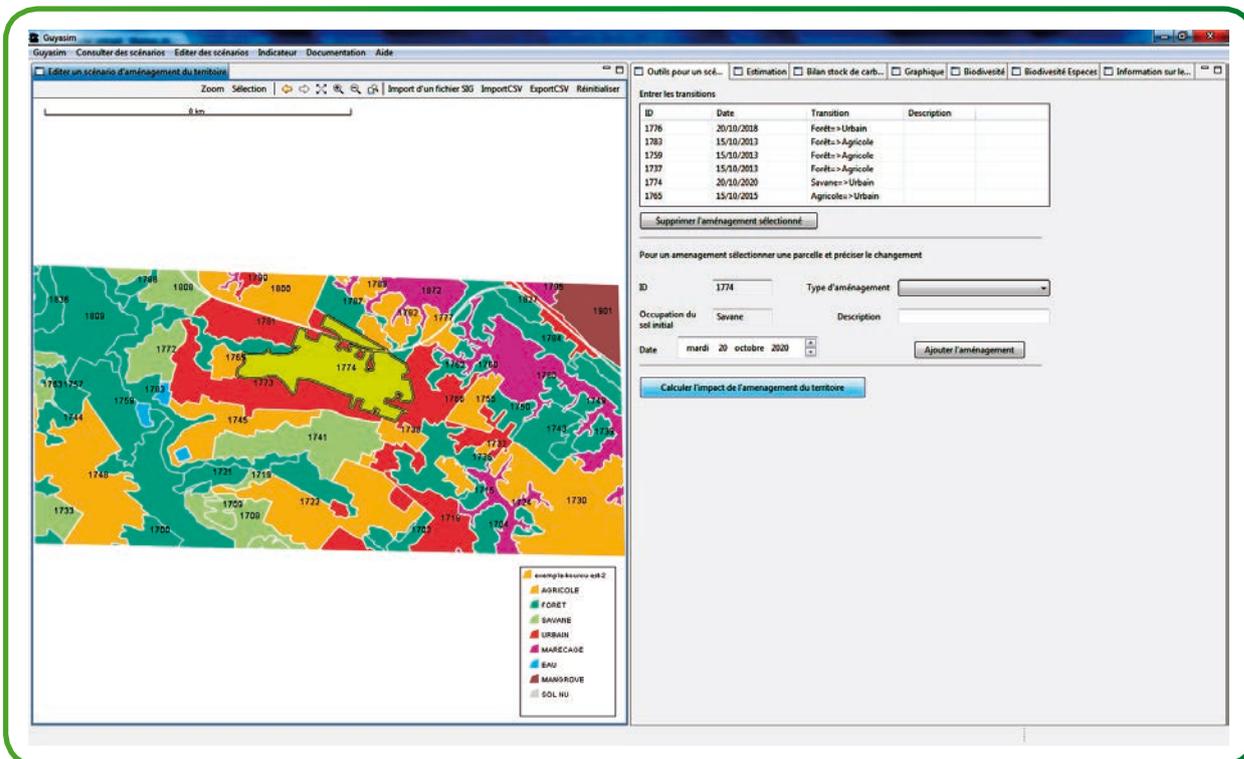


Figure 3. Fenêtre de définition d'un scénario d'aménagement du territoire.

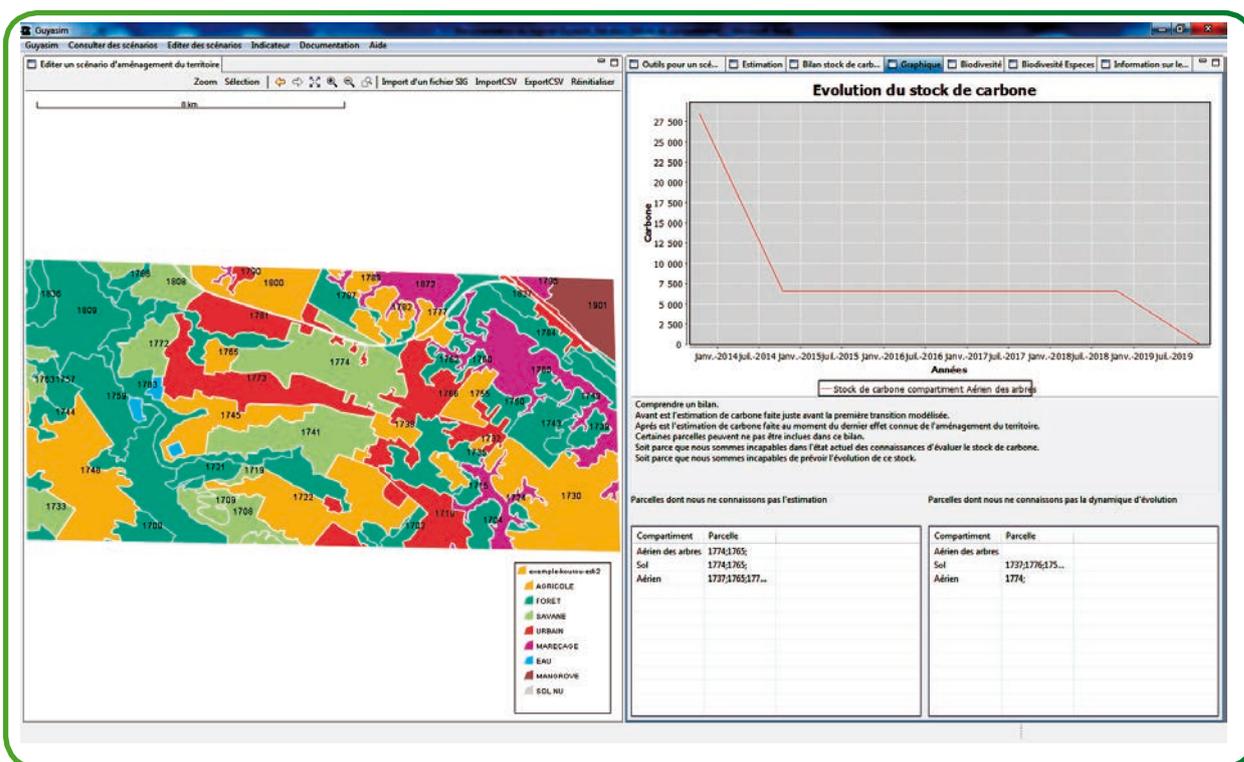


Figure 2. Fenêtre de résultat d'un scénario d'aménagement du territoire.

Bilan carbone et gestion forestière en Guyane

DESCROIX L.¹, BRUNAU O. ¹, BEZARD V.¹

¹ ONF Pôle Recherche & Développement de Cayenne, Réserve de Montabo BP 7002 97307 Cayenne Cedex

1. Éléments du contexte guyanais

La surface forestière de la Guyane est de l'ordre de 8 millions d'ha avec un taux de boisement de 96%. 5,5 millions sont gérés par l'ONF et 2,1 millions par le Parc Amazonien de Guyane. Le stock de biomasse aérienne contenu dans les forêts de Guyane représente 1 à 1,5 fois celui des forêts métropolitaines.

Il n'y a à ce jour en Guyane pas d'inventaire forestier équivalent à ceux réalisés en France métropolitaine ou dans nombre de pays des forêts tempérées, notamment en raison des difficultés d'accès à des placettes d'inventaires distribuées sur l'ensemble du territoire (Guitet et al. 2005).

La récolte actuelle de bois est de 80 000 m³ de bois d'œuvre par an, sur 7 000 ha an⁻¹ de forêt. L'exploitation est cantonnée sur les terrains de terre ferme et dans les zones peu pentues, représentant 4 000 ha/an réellement parcourus en coupe. Sur ces 4 000 ha, la densité de prélèvement est de 4 à 5 tiges ha⁻¹ de bois d'œuvre, soit 20 à 25 m³ha⁻¹ d'essences commercialisables.

Dans les coupes conventionnelles, ces 20 m³ha⁻¹ de bois d'œuvre récoltés représentent de l'ordre de

- 6 tonnes de biomasse anhydre par ha⁻¹ produits en sciage,
- 9 tonnes de produits connexes de scierie, en grande partie utilisée pour l'approvisionnement en biomasse de la centrale biomasse Voltalia de Kourou,

Environ 50 tonnes ha⁻¹ de biomasse morte sont laissées sur la parcelle (Fig 1). Le bois abandonné est constitué par les purges de billons impropres au sciage (empâtements de billes de pied), de bois pourri, les houppiers et les dégâts d'exploitation lors de l'abattage et du débardage (Fig 2).

La récolte de bois d'œuvre extraite de forêt représente environ un quart de la biomasse totale détruite lors de l'exploitation.

Une coupe de bois d'œuvre conventionnelle représente au total 65 tonnes de biomasse détruite sur le peuplement initial, soit de l'ordre de 20 % du volume initial de la forêt (310 tonnes par ha pour les peuplements de terre ferme).

2. Les mesures de réduction des impacts de la gestion forestière sur les émissions carbone

Plusieurs actions actuellement engagées contribuent à améliorer les bilans carbone de l'exploitation forestière, soit en réduisant la quantité de biomasse détruite du peuplement initial, soit en contribuant à réduire les émissions de carbone fossile par substitution.

2.1 L'exploitation forestière à faible impact - EFI

L'EFI a été développée depuis plusieurs années en Guyane. Elle a fait l'objet en 2011 d'une charte d'Exploitation à Faible Impact et rentre dans un processus d'amélioration continu intégrant les innovations du machinisme forestier et des outils de géomatique. Elle met en œuvre plusieurs techniques qui contribuent à réduire les dégâts d'exploitation en améliorant la productivité économique et les conditions de travail des opérateurs (fig 8).

Il s'agit principalement de :

- la géolocalisation de l'ensemble des opérations de désignation des arbres, ainsi que des phases d'exploitation (de l'abattage au débardage) améliorant la traçabilité des bois et réduisant les bois perdus en forêt,
- l'utilisation de modèles numériques de terrain précis (en ayant notamment recours au Lidar aérien) permettant une

meilleure optimisation des cloisonnements d'exploitation et une meilleure précision dans leur implantation (Fig 3.)

- la mise en œuvre de débusqueuses dotées de bras de manipulation des grumes et de câbles de débusquage, permettant de pêcher les bois jusqu'à 30 / 40 m de distance des pistes de débusquage sur lesquelles circulent les engins d'exploitation, réduisant ainsi la densité du réseau de pistes d'exploitation et les dégâts sur le peuplement en place (Fig 6.).

Le développement de l'Exploitation à Faible Impact représente un facteur sensible de réduction des émissions carbone par la diminution des dégâts d'exploitation.

Des coupes réalisées en 2012 traduisent une diminution des dégâts de l'ordre de moitié, diminuant sensiblement la part de bois détruite et abandonnée sur coupe (Fig 4).

Le ratio bois d'œuvre récolté sur mortalité totale passe de 23% dans les coupes de bois conventionnel à 41% dans les coupes réalisées en EFI en 2012, sur lesquelles des diagnostics d'exploitation ont été réalisés.

2.2 La récolte de bois énergie dans les coupes de bois d'œuvre

Avec l'évolution de ses besoins énergétiques, la Guyane met en place un important programme de centrales biomasses pour la production d'électricité avec un objectif de l'ordre de 30 MW nouveaux installés d'ici 2030 (ONF & CIRAD 2007).

Un des approvisionnements envisagés provient de la récolte des sous-produits d'exploitation du bois d'œuvre actuellement abandonnés en forêt mentionnés plus haut, avec un rendement matière de l'ordre de 25 t ha⁻¹.

Cette valorisation complémentaire des produits d'exploitation en bois énergie conduit à un prélèvement représentant 70% de la biomasse détruite sensiblement supérieur aux 25% de prélèvement dans les coupes conventionnelles (Fig 5).

Elle doit laisser sur le parterre de la parcelle le bois raméal qui contient une part importante des éléments minéraux qui entrent dans l'équilibre de l'écosystème forestier.

Le potentiel de récolte de ces sous-produits de l'exploitation forestière est estimé à une centaine de milliers de tonne de bois énergie par an (poids brut brut H 2 ~ 30% d'humidité), qui viendront en partie en substitution de combustibles fossiles (ADEME & ONF 2011).

2.3 La valorisation des bois d'emprise des routes forestières

L'exploitation des 80 000 m³ de bois d'œuvre annuels nécessite l'implantation de 40 km de route forestière par an (figure 7).

Les bois d'emprise de ces routes forestières sont actuellement poussés et abandonnés en limite d'emprise.

Ils représentent environ 1 % du contenu en carbone des peuplements desservis (en comptant aussi le contenu des peuplements des zones de pente et de bas fond laissés hors des exploitations). Ces coupes d'emprise sont susceptibles de produire une récolte de l'ordre de 20 000 tonnes de biomasse anhydre par an pour l'approvisionnement de centrales biomasses.

3. Les synergies développées

Les recherches conduites dans la mobilisation de ces gisements le sont en interdépendance avec le développement de méthodes contribuant à améliorer l'impact carbone global de toute la filière biomasse et les politiques qui les orientent.

En particulier, les procédés améliorant le rendement des centrales électriques dans la valorisation du contenu énergétique du bois constituent un enjeu essentiel de consolidation de la filière biomasse, notamment de leur empreinte carbone (cogénération, gazéification).

Par ailleurs, la mécanisation développée pour la récolte du bois énergie dans les coupes de bois d'œuvre est également adaptée aux chantiers de défriches agricoles et urbaines, qui sont identifiées comme un gisement important pour l'approvisionnement des centrales biomasses.

4. Les consolidations de la recherche

Plusieurs recherches, actuellement conduites ou en projet, ont vocation à consolider les politiques de maîtrise des émissions carbone :

- le dispositif GUYAFOR sur la dynamique des peuplements naturels et en exploitation (Hérault et al. 2013),
- l'étude des impacts des exploitations sur la dynamique des sols forestiers, mais plus généralement des populations et des écosystèmes,
- l'évolution des itinéraires techniques dans la gestion forestière, et notamment l'amélioration continue de l'exploitation à faible impact
- les outils de télédétection aérienne et spatiale pour les cartographies des peuplements et leurs caractérisations,
- les bilans globaux des émissions et des captures de carbone dans la gestion forestière (GUYASIM, Dolley et al. 2013).

Remerciements

Les auteurs remercient tous les organismes qui ont contribué à l'effort d'amélioration continue de la gestion durable de la forêt guyanaise, et plus particulièrement les entreprises d'exploitation forestières SFA et SGBG qui sont au cœur de ce dispositif dans les mises en œuvre et les innovations de terrain.

Références

ADEME, ONF. 2011. « Production de bois-énergie sur un massif forestier dédié à cette vocation en Guyane - étude de cas en forêt de Balata Saut-Léodate (Guyane française) », 105 p.

Dolley T, Blanfort V, Cornu G, Hérault B, Rossi V. 2013. Guyasim, un outil d'aide à la décision pour évaluer des services écosystémiques de la forêt guyanaise. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 2, 4 p.

Guitet S, Blanc L, Chave J, et Gomis A. 2006. Expertise sur les références dendrométriques nécessaires au renseignement de l'inventaire national de gaz à effet de serre pour la Guyane. Rapport Ministère de l'Agriculture. 37 p.+ annexes.

Hérault B, Freycon V, & Molto Q. 2013. Stocks de C dans les forêts tropicales humides. Forêts naturelles & Reconstitutions post-exploitation. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 3, 4 p.

ONF, CIRAD, 2007, « Etude technico économique sur les possibilités de la biomasse pour l'alimentation électrique de la Guyane », 117p.

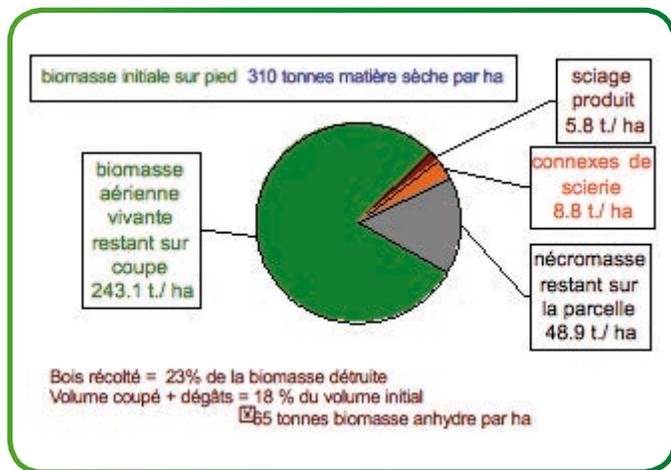


Figure 1. Répartition de la biomasse aérienne dans une coupe de bois d'œuvre conventionnelle.



Figure 2. Bois abandonné dans une coupe de bois d'œuvre valorisable en bois énergie - empâtements, empâtements de billes de pied, bois pourri, houppiers, dégâts d'exploitation.

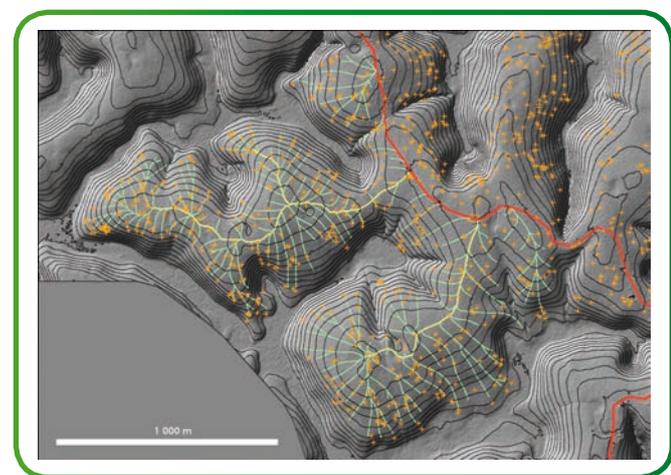


Figure 3. Géolocalisation des arbres à exploiter et implantation des cloisonnements d'exploitation sur un modèle numérique de terrain issu du Lidar aérien.

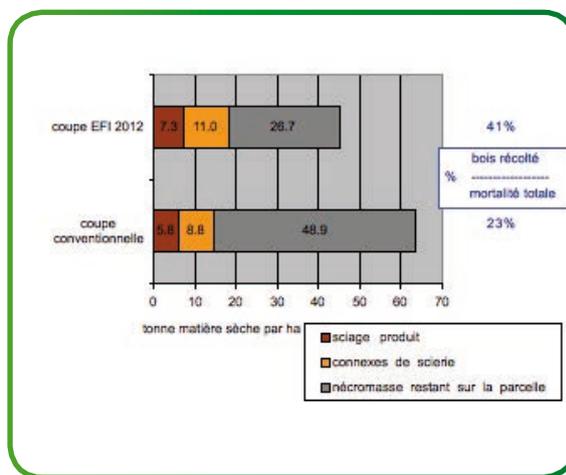


Figure 4. Répartition de la biomasse détruite coupe Exploitation à Faible Impact et coupe conventionnelle.

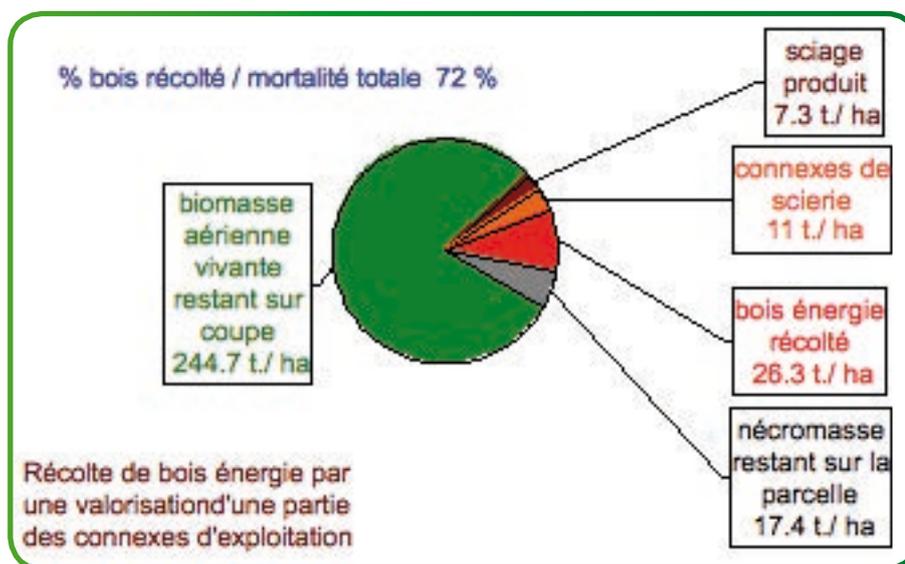


Figure 5. Répartition de la biomasse aérienne dans une coupe de bois d'œuvre avec bois énergie.



Figure 6. Débusqueuse à treuil avec câble synthétique et grappin à bois.



Figure 7. Route forestière.



Figure 8. Canopée dans un peuplement après exploitation à faible impact.

Bilan de carbone de prairies issues de déforestation en Amazonie française (Guyane)

BLANFORT V^{1,2}, STAHL C^{1,2}, KLUMPP K³, FONTAINE S³, PICON COCHARD C³, FALCIMAGNE R³, BLOOR J³, LECOMTE P¹, JOBIN M¹, THIERRIOT P¹, BOVAL M⁴

¹ CIRAD UMR SELMET, Campus international de Baillarguet - TA C-18, 34398 Montpellier Cedex 5, France

² CIRAD UMR SELMET, BP 701, 97387 Kourou Cedex, Guyane française

³ INRA UREP, Site de Crouël 234 avenue du Brezet, 63100 Clermont-Ferrand, France

⁴ INRA, URZ 143, Unité de Recherches Zootechniques, Domaine Duclos, Prise d'Eau, F-97170 Petit Bourg, Guadeloupe

Introduction

Le développement de l'élevage de ruminants et ses conséquences sur les changements climatiques font l'objet d'un débat renouvelé qui prend désormais en compte les services écologiques en particulier ceux rendus par les systèmes herbagers (FAO 2013, Steinfeld et al. 2006, 2010 in Lecomte & Blanfort, 2013). En Guyane française, la filière bovine, qui ne couvre actuellement qu'environ 20 % de la consommation de viande illustre bien cette situation. Le doublement prévu de la population guyanaise d'ici 2030 implique un développement endogène du territoire pour répondre aux besoins alimentaires croissants. L'expansion en cours des systèmes herbagers éleveurs naisseurs engraisseurs (selon INSEE 2010 : 31 % de la SAU de 25133) même si elle ne représente qu'une très petite partie des 8 millions d'ha de forêt tropicale humide (96 % du territoire) doit être accompagnée par des recherches sur une gestion durable des pâturages conciliant production et services environnementaux.

Dans le cadre du projet CARPAGG1, nos travaux visent la production de références adaptées au contexte tropical humide afin de contribuer à l'établissement de bilans carbone dans les systèmes herbagers issues de déforestation. Ces bilans s'appuient sur les résultats des études sur les stocks et les flux de carbone en prairie (Blanfort et al. 2013, Stahl et al. 2013) qui explorent le potentiel de séquestration du gaz carbonique (CO₂) dans les sols.

Afin de contribuer à l'établissement de bilan C et de gaz à effet de serre (GES), il est nécessaire de prendre en compte dans ces mêmes parcelles pâturées, les émissions des deux principaux GES en élevage : le méthane : CH₄ et l'oxyde nitreux : N₂O. Dans le cadre du contexte guyanais, les estimations de N₂O et de CH₄ permettent d'estimer les niveaux d'émissions de GES des systèmes herbagers de Guyane en tenant compte des conditions locales et des pratiques des éleveurs.

1. Les recherches menées en Guyane sur l'établissement de bilan C dans les systèmes herbagers bovins

Nos dispositifs de recherches concernent des parcelles dans deux exploitations d'élevage typiques des systèmes herbagers bovins du littoral guyanais. De type semi-extensif (chargement moyen ~ 1 vache/ha, faible utilisation d'intrants), ils sont en grande partie issus de déforestation avec mise en place de prairies implantées (*Brachiaria* sp). En 2010, deux dispositifs appliquant la méthode de fluctuation turbulente pour les mesures de flux de CO₂ (tours à flux) ont été installées dans 2 prairies pâturées d'âges très contrastés, l'une déforestée en 1978 (E5- extensif) et l'autre en 2008 (AV31- intensif) (Stahl et al. 2013). Des mesures et des estimations des émissions de N₂O et de CH₄ ont été réalisées sur ces mêmes parcelles, pour le calcul des émissions de N₂O et de CH₄ sur ces mêmes parcelles afin d'établir des bilans nets de GES à l'échelle des parcelles étudiées (Fig 1.).

Produit de la rumination, le CH₄ est principalement émis lors de la fermentation entérique des ruminants. Le dispositif a permis de tester des méthodes indirectes (Fig. 2a) basées sur l'analyse de la composition des fèces pour estimer les émissions de méthane des bovins (n=289 prélèvements durant la saison sèche 2011 et la saison humide 2012). Des échantillons de fèces de bovins Zébus Brahman pâturant des parcelles à base de *Brachiaria humidicola* ont été analysés par Spectrométrie proche Infra Rouge (SPIR), en complément d'une analyse classique de la teneur en

azote fécal (méthode de DUMAS). Sur la base de modèles de prédiction du CH₄ (Boval et al. et al. 2003, Fig. 2b) les émissions de méthane ont été estimées pour le troupeau à partir du régime (Sauvant et al. 2011, Archimède et al. 2012). Un bilan annuel de CH₄ à la parcelle a pu être déterminé.

Les émissions de N₂O en provenance de l'activité microbienne dans le sol, plus particulièrement les processus de dénitrification et de nitrification (Webster, et al. 1999) sont fortement liés à l'application d'engrais azotés minéraux/ organique (i.e. lisier), à la gestion des déjections animales et la présence de légumineuses. Les mesures de flux de N₂O ont été réalisées par des chambres statiques reliées à un analyseur de gaz photo-acoustique. Un seul site prairial (E5) a été suivi pour N₂O durant la saison des pluies et une extrapolation a été réalisée pour l'année pour les deux sites (n=248 mesures en saison des pluies 2012).

La composition des troupeaux et les poids vifs ont été évalués en parallèle.

2. Résultats

Les flux d'oxyde nitreux (N₂O)

Le flux moyen observé sur notre site (4.4 g N-N₂O ha⁻¹J⁻¹) reste faible vis-à-vis de systèmes herbagers intensifs. Le flux est plus élevé que celui obtenu en Guyane sur des prairies fauchées (Tab.1), sans doute du fait de la présence des animaux et de l'apport d'azote par les pissats. Il est comparable à la bibliographie avec des conditions similaires de pâturage extensif. On remarque la très forte variabilité de nos mesures liées à des valeurs de flux très faibles et une forte hétérogénéité spatiale des processus de N₂O du sol constatée dans toutes les études.

Estimation des émissions de méthane (CH₄)

Les résultats d'estimations de méthane ont conduit à des productions journalières comprises entre 0,3 et 0,4 g de CH₄ kg⁻¹ de poids vif suivant les différents modèles de prédiction, soit 40 à 58 kg CH₄ par an pour une jeune vache de 400 kg. Les valeurs obtenues diffèrent peu entre les deux modèles mais la variabilité est plus forte avec les mesures à l'azote fécal.

Dans les deux cas, les valeurs obtenues sont dans l'ensemble plus faibles que les facteurs d'émission énoncés par des organismes nationaux ou internationaux tels que le GIEC selon la méthode du niveau 2 pour des catégories d'animaux équivalentes. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'évaluer à partir de méthodes prédictives, les émissions de méthane à l'échelle de la parcelle. Par rapport à l'utilisation de coefficients de conversion standards, cela offre l'avantage de refléter le contexte particulier de l'exploitation et son fonctionnement.

Estimation du bilan annuel moyen des flux de GES à l'échelle parcelle

Les flux de CO₂ mesurés par les tours à flux sur nos 2 sites prairiaux montrent un échange net du C contrasté sur les 2 prairies étudiées (Stahl et al. 2013). En moyenne sur les années 2011-2012, les deux prairies sont des puits de C potentiels. La prairie âgée (E5) stocke 1.79 ± 0.51 tC ha⁻¹ an⁻¹ et la prairie jeune (AV31) montre un stockage plus faible de 0.43 ± 0.63 tC ha⁻¹ an⁻¹ (voir nul vu l'incertitude pour ces 2 années).

Les flux de CO₂ mesurés par les tours à flux sur nos 2 sites prairiaux montrent un bilan de fixation du C contrasté sur les 2 prairies étudiées (Stahl et al. 2013). En moyenne sur les années

2011-2012, la prairie âgée (E5) est un puits de carbone important pour les 2 années, avec $-1.79 \pm 0.51 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. La prairie jeune (AV31) montre un bilan nul avec $-0.43 \pm 0.63 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

Afin d'obtenir une unité commune, les flux mesurés de N_2O et les estimations des émissions CH_4 propres à chaque site pour les années 2011-2012 ont été convertis en tonnes équivalent Carbone (tCeq ha^{-1}). Pour N_2O , le nombre de jours où la parcelle est exploitée permet d'estimer les émissions par ha sur la période considérée. Pour CH_4 , les chargements instantanés intègrent le nombre d'animaux présents et le nombre de jours pâturés. Ils s'élèvent en moyenne pour 2011/2012 à 1,9 et 4,3 têtes/ha/an pour E5 et AV31, respectivement.

Un bilan net de GES (moyen sur ces 2 années) a pu être calculé (Tab 1.). La prairie ancienne, du fait d'un stockage important de C, compense largement ses émissions de méthane et d'oxyde nitreux avec au final un stockage net de près de $1.2 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Tab. 2). La prairie jeune, du fait d'un stockage de C plus faible et des émissions en méthane particulièrement élevées du fait d'un fort chargement pour la période présente un bilan GES final émetteur de plus de $0.8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

Cette première estimation a été élaborée pour la période considérée, elle doit être régulièrement ajustée pour tenir compte des modifications de pratiques d'exploitation de pâturages. Elle demande de plus à être confortée par d'autres mesures et traitements sur les flux de CO_2 et par une meilleure appréciation des incertitudes.

Conclusion

Dans le contexte fortement évolutif de l'adaptation de l'agriculture aux changements climatiques et au secteur UTCATF (Utilisation des Terres et Changement d'Affectation des Terres et Foresterie) (GIEC, 2000), l'évaluation de bilan carbone à différentes échelles constitue un enjeu important du secteur agricole fortement impliqué dans ces problématiques.

Les références produites dans les systèmes herbagers amazoniens de Guyane montrent que le potentiel de stockage de C à long terme dans le sol des prairies est un facteur essentiel dans l'établissement du bilan carbone à la mise en place de ces systèmes et de leur gestion. Cependant la réalisation de bilan net intégrant les émissions de CH_4 et de N_2O montre que le maintien d'un bilan carbone net favorable est notamment très dépendant des pratiques.

Ces références sont mobilisables dans l'accompagnement du développement de l'élevage et de l'aménagement du territoire. Elles alimentent déjà l'outil Guyasim (« Simulateur pour explorer l'impact environnemental des scénarios de développement de la Guyane ». Dolley et al. 2013) et sont en cours d'intégration dans l'Observatoire du Carbone et des GES de Guyane (Sirder & Oulliac 2013). D'autres outils utilisés ou mis au point par des agences comme l'ADEME au niveau national (Feix 2013) intégrant le carbone biogénique des secteurs agricoles et forestiers doivent prendre en compte les particularités agro-écologiques des DOM des zones tropicales.

Par ailleurs, les évolutions des règles de comptabilisation des émissions et séquestration des GES pour la 2^e période d'engagement du protocole de Kyoto intègrent désormais les absorptions et émissions de GES des terres cultivées et des prairies, en sus des activités forestières. Elles nécessitent aussi la mise en place d'outils et de références adaptés (Feix 2013). Concernant les échelles parcelles/exploitations, nos résultats alimentent des modèles sur les émissions GES (Lardy et al. 2010) en cours d'adaptation aux zones tropicales (Lecomte & Blanfort, 2013). Nos résultats constituent une base de travail générique mobilisable à plusieurs échelles. Les indicateurs d'émission/séquestration des GES restent cependant à valider en particulier sur les processus de flux qui sont par définition dynamique donc complexes à analyser.

Remerciements

Les auteurs remercient les éleveurs guyanais H. Bergère et J. Mornand ainsi que les chercheurs et les techniciens du CIRAD Guyane et de l'INRA Guadeloupe qui ont contribué à cette étude. 1 Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet CARPAGG (CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre), cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER PO 2007-2013) et le Cirad.

Références

Référence issues des Actes de la journée « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013 :

Blanfort V, Ponchant L, Dézécache C, Stahl C, Freycon V, Picon-Cochard C, Blanc L, & Fontaine S. 2013. Dynamique du carbone dans les sols de prairies issues de la déforestation de la forêt guyanaise. Session 3, 4 p.

Dolley T, Blanfort V, Comu G, Hérault B, Rossi V. 2013. Guyasim, un outil d'aide à la décision pour évaluer des services écosystémiques de la forêt guyanaise. Session 3, 4 p.

Feix I. 2013. Actions de l'ADEME en termes de bilan gaz à effet de serre : outils et méthodes pour l'agriculture et la forêt. Session 4, 4p.

Lecomte P, & BLANFORT V 2013. Elevage, gaz à effet de serre et changements d'utilisation du territoire. Session 1, 4 p.

Sirder H, & Oulliac B. 2013. Vers un observatoire guyanais en du carbone et des gaz à effet de serre (GES). Session 1, 4 p.

Stahl C, Klumpp K, Falcimagne R, Picon-Cochard C, & BLANFORT V 2013. Flux de C échangés entre l'écosystème prairial et l'atmosphère en Amazonie française. Session 2, 4 p.

Autres références

Archimède et al. 2012. Comparison of methane production between C3 and C4 grasses and legumes. *Animal Feed Science and Technology*. Vol 166–167, p.59–64.

Boval M, Coates D.B, Lecomte P, Decruyenaere V, & Archimède H. 2003. « Faecal near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to assess chemical composition, in vivo digestibility and intake of tropical grass by Creole cattle. » *Animal Feed Science and Technology*: 11.

Dixon R, Boval M, Blanfort V, Decruyenaere V, & Coates D. 2013. Faecal near infrared spectroscopy to measure the diet selected & productivity of grazing ruminants. 22nd International Grasslands Congress Sydney | 15 - 19 September 2013, Revitalising grasslands to sustain our communities.

Sauvant D, Giger-Reverdin S, Serment A, & Broudisco L. 2011. Influences des régimes et de leur fermentation dans le rumen sur la production de méthane par les ruminants. *Inra Productions Animales*, 24 (5), p.433-446.

Soussana J.F, Tallec T, BLANFORT V 2010. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal*, 4, p. 334-350.

Webster E. A, & Hopkins D. W. 1999. Contributions from different microbial processes to N_2O emission from soil under different moisture regimes. [Rapport]. - [s.l.] : *Biology and fertility of soils* 22, p. 331-335.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2000). Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nyenzi B., Emmanuel S., Buendia L., Hoppaus R., Martinsen T., Meijer J., Miwa K. et Tanabe K. (éds). *Recommandations en matière de bonnes pratiques et gestion des incertitudes des inventaires nationaux de gaz à effet de serre*. GIEC/OCDE/AIE/IGES, Hayama, Japon.

Flux de N ₂ O (g N-N ₂ O ha ⁻¹ .J ⁻¹)	Ecartype	Type de traitement	Climat	Référence
4.4	16.7	Pâturage humide saison	Site Bio savanne E5	Etude actuelle CARPAGG 2012
1.7	-	Prairie non pâturée	Tropical, Site Pointe Combi	Thèse Petitjean 2013
2.4	2.3	Pâturage en saison humide	Tropical	Simona et al. 2004
1.8	4.1	Pâturage extensif	Tempéré	Flechard et al. 2007
7.5	8.1	Pâturage intensif (200 Kg N .ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Tempéré	Flechard et al. 2007

Tableau 1. Synthèse des flux moyens de protoxyde d'azote en pâturage.

Type de prairie	Parcelle	Flux annuel de C (tour à flux) CO ₂ (tC ha ⁻¹ an ⁻¹)	Flux annuel de C lié aux émissions de CH ₄ des bovins (CH ₄ éq tC ha ⁻¹ an ⁻¹)	Flux annuel de C lié aux émissions de N ₂ O (N ₂ O éq tC ha ⁻¹ an ⁻¹)	Bilan net de GES en (tC _{eq} ha ⁻¹ an ⁻¹)	Incertitude (tC ha ⁻¹ an ⁻¹)
Anciennes (1978)	Bio-savane E5	- 1.8	+0.5	+0.13	-1.17	± 0.5
Jeunes (2008)	ETVM AV31	- 0.43	+0.98	+0.31	+0.86	± 0.5

Tableau 2. Estimation du bilan annuel moyen 2011-2012 des flux de GES à l'échelle de la parcelle (t C/ha/an). Chiffre négatif = puits de C ; chiffre positif=source de C.

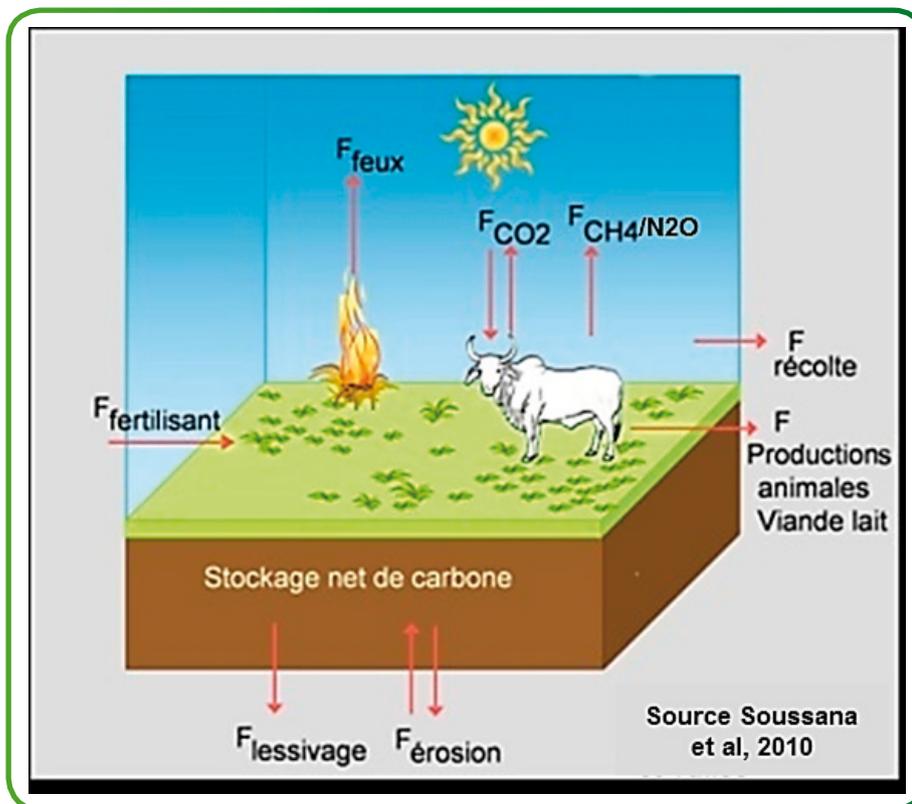


Figure 1. Schéma des flux entrants et sortants d'un pâturage (d'après Soussana et al. 2010).

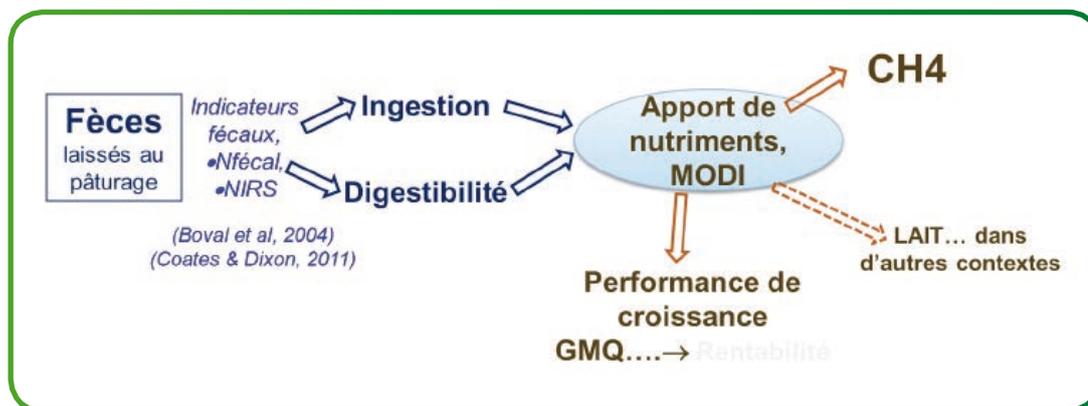
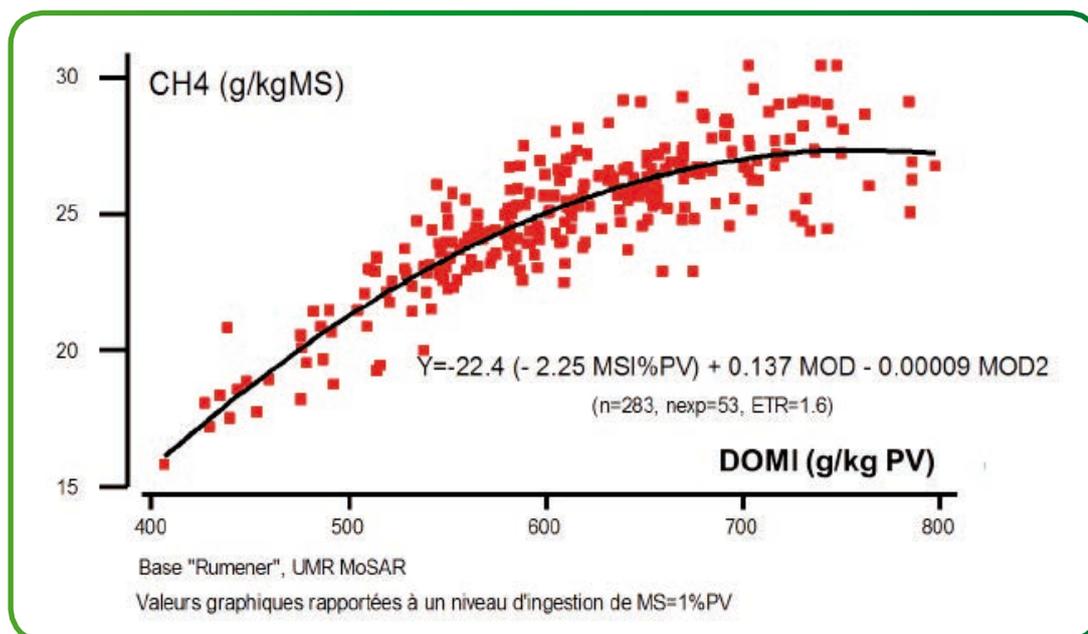


Figure 2. Estimation des émissions de méthane à partir de la MODI (Matières Organiques Ingérées Digérées).

2a. L'animal ingère des aliments dont il excrète la fraction indigestible via les fèces. La partie digeste constitue la part de nutriments apportés à l'animal pour couvrir ses besoins. La MODI est le produit de la matière organique ingérée (MOI) et de la digestibilité de cette matière organique (dMO). Sur ce principe, à partir des échantillons de fèces, on estime le régime et la MODI à partir de laquelle sont déduites à leur tour les quantités de méthane émises pendant la rumination.

Cette approche permet en outre d'évaluer le régime pâturé des animaux et de prévoir leur performance réelle (GMQ). Il devient alors possible d'envisager des approches couplées sur l'efficacité de production et l'efficacité environnementale d'un système d'élevage (Lecomte et Blanfort, 2013).



2b. L'équation de Sauvant et al. (2011) a été établie sur une méta-analyse réalisée sur plus de 1000 échantillons de fourrages de régions tempérées et de concentrés. Elle exprime la relation entre la teneur en MOD des fourrages et la production de CH₄ associée.

$$\text{CH}_4(\text{g.kgPV}^{-1}.\text{J}^{-1}) = 0,083 + 0,025 \times \text{MODI}(\text{g.kgPV}^{-1}.\text{J}^{-1}) \text{ avec } n = 1008$$

Pour avoir une estimation du méthane émis sur une année par une vache :

$$\text{CH}_4(\text{kg.tête}^{-1}.\text{an}^{-1}) = \text{CH}_4(\text{g.kgPV}^{-1}.\text{J}^{-1}) \times 365 \times \text{PV}/1000$$

L'équation d'Archimède et al. (2012) a été établie dans le cadre du projet EPAD (Efficience environnementale et Productions Animales pour le Développement Durable) ou une base de données mesurées a permis d'estimer le méthane produit. L'équation est issue de cette base qui comprend à la fois des fourrages de régions tempérées et des fourrages de régions tropicales (n = 115):

$$\text{CH}_4(\text{g}.\text{J}^{-1}) = 1,64396 + 0,0351113 \times \text{MODI}(\text{en g}.\text{J}^{-1})$$

Pour exprimer la MODI en g : $\text{MODI}(\text{en g}.\text{J}^{-1}) = \text{MODI}(\text{g.kgPV}^{-1}.\text{J}^{-1}) \times \text{PV}$.

Vers un observatoire guyanais du carbone et des gaz à effet de serre (GES)

SIRDER H¹ & OULIAC B²

¹ 2^{ème} Vice-Président de la Région Guyane – Présidente de l'OREDD

² Chef Projet Stratégie Régionale d'Innovation – Région Guyane - 4179 Route de Montabo – 97300 Cayenne

Introduction

La problématique du carbone est encore émergente en Guyane. Pourtant le territoire guyanais, « l'Amazonie française », présente des spécificités majeures dans le contexte tant français qu'europpéen. La Guyane, par sa grande superficie et sa faible densité de population représente par ailleurs l'une des dernières réserves forestières d'importance pour la France et L'Europe. C'est également l'un des massifs de forêt amazonienne les mieux préservés.

Avec une croissance démographique importante, une économie active et une extension des superficies agricoles et urbaines importantes, en partie (ou grande partie ?) au détriment de la forêt, les problématiques de gestion du stock et des flux de carbone et des GES vont représenter des enjeux majeurs dans les années à venir.

C'est pourquoi l'ensemble des partenaires locaux, scientifiques, institutionnels et économiques, regroupés autour de la Région Guyane ont souhaité la mise en place rapide d'un Observatoire Guyanais du Carbone et des GES, porté par l'Observatoire Régional de l'Energie et du Développement Durable (OREDD). (<http://www.cr-guyane.fr/ored/quest-ce-que-loredd/>).

1. Enjeux et objectifs de l'observatoire

1.1. Problématique et enjeux

L'objectif visé par l'observatoire, soutenu par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) et le Conseil Régional de Guyane vise à la mise en place d'un dispositif de collecte et de synthèse des connaissances scientifiques et des informations disponibles pour accompagner la politique carbone et gaz à effet de serre de la Guyane concernant la gestion des forêts, le développement agricole et l'aménagement du territoire. Il semble en effet que ces secteurs, contrairement à d'autres régions d'Europe à caractère plus industriel soient les plus impactants sur les bilans régionaux.

En revanche, il existe à l'heure actuelle peu de données exploitables issues de zones avec des caractéristiques socio-environnementales similaires. La Guyane peut être considérée comme ayant une forte compétence scientifique concernant le carbone des écosystèmes amazoniens. Néanmoins, les données produites sont jusqu'à maintenant encore trop restreintes au domaine scientifique et aucune structure n'était à même d'accompagner leur appropriation par le secteur public, et les acteurs du monde économique. Au-delà des aspects de collecte et de traitement de l'information, centraux dans le rôle de cet observatoire, il s'agit avant tout d'un outil dédié au transfert de technologie et à l'appropriation des résultats de recherche par et pour les décideurs publics ou de l'aménagement ainsi que les filières économique en particulier l'agriculture ou l'exploitation forestière.

1.2. Objectifs spécifiques et organisation

L'ensemble des partenaires abordant la thématique du carbone en Guyane sera concerné par la mise en œuvre de cet observatoire. Le partenaire scientifique privilégié sera le CIRAD, en partenariat avec d'autres institutions de recherche comme l'INRA. Sur le plan institutionnel, outre la Région Guyane, les principaux institutionnels concernés par la question (ADEME, ONF, DAAF, DEAL) sont également fortement impliqués dans la démarche (à la fois comme utilisateur et comme pourvoyeur d'informations).

Ce réseau de partenaires est détaillé sur la figure 1.

La mission de l'observatoire consiste à animer ce réseau et à

faire interagir les experts travaillant en Guyane dans le domaine du carbone, les acteurs détenteurs d'informations sur carbone et GES, les acteurs de la gestion et de la conservation des ressources forestières, de l'aménagement du territoire, les services de l'Etat et les décideurs de l'action publique. Un des objectifs est de fédérer à terme toutes les compétences de la Guyane sur la question carbone et GES dans le cadre d'une mission autonome qui sera portée par l'OREDD. Les objectifs à court terme de la mise en place de l'observatoire sont en particulier de :

- Rassembler, actualiser et mettre à disposition des acteurs politiques, administratifs et économiques guyanais les connaissances scientifiques, concernant les stocks et bilans de flux de carbone des forêts, des zones agricoles et des zones anthropisées issues de déforestation (rapports d'expertise et données de recherche),
- Rassembler, actualiser et mettre à disposition des acteurs politiques, administratifs et économiques guyanais les chiffres et informations disponibles concernant les bilans de carbone et de gaz à effet de serre des secteurs énergétiques et non énergétiques en lien avec les activités actuelles de l'OREDD sur ces secteurs,
- Fournir un bilan carbone et gaz à effet de serre global du territoire guyanais incluant les zones forestières, les changements d'utilisation des sols et les activités humaines,
- Evaluer l'impact carbone et gaz à effet de serre des schémas de développement et d'aménagement régionaux (en intégrant notamment les choix faits en matière de politique agricole et énergétique) et identifier les alternatives techniques permettant d'améliorer les bilans,
- Evaluer l'impact des pratiques d'aménagement et de gestion des systèmes forestiers/agricoles sur les flux et stocks de carbone et identifier les alternatives techniques permettant d'améliorer les bilans (cibles filières de production, institutions d'appui technique, les producteurs),
- Sur la base de son expérience et des demandes des acteurs politiques, identifier les besoins en connaissances et outils complémentaires,
- Faire une synthèse des mécanismes financiers, mis en œuvre ou en cours de négociation au niveau national et international, liés aux mécanismes REDD+, de leur domaine d'application et de la position de la Région Guyane au sein de ces mécanismes. En ce sens, le projet « REDD+ plateau des Guyanes », (financement Union Européenne INTERREG Caraïbes IV), porté par ONF International sera un partenaire clé pour l'apport et la synthèse des données.

2. Objectifs à long terme et perspectives

2.1. Mise en place d'une dynamique territoriale

Comme explicité précédemment, un des objectifs majeurs de l'observatoire consiste à développer une réelle structure d'expertise et de conseil sur les impacts carbone des politiques publiques. En ce sens l'observatoire devra apporter à terme des services d'aides à la décision. Des relations fortes seront entretenues en particulier avec le projet GUYASIM (Dolley et al. 2013) qui vise en particulier à développer une méthode et un outil de simulation des impacts carbonés des projets de développement.

Au-delà des aspects techniques, il est également nécessaire de faire émerger et d'animer une réelle dynamique sur la question du carbone en Guyane. A ce titre, les principales missions de long terme de l'observatoire sont les suivantes :

- Faire émerger en Guyane une structure de référence

regroupant des experts sur le thème du carbone des forêts et des zones déforestées avec vocation de coopération au-delà de la Guyane (plateau des Guyanes et bassin amazonien);

- Sécuriser l'acquisition de données sur le carbone et les gaz à effet de serre en soutenant les dispositifs d'observation et de suivi existants et en contribuant à la planification de leurs évolutions,
- Communiquer, sensibiliser et animer les acteurs et le grand public aux enjeux liés au carbone ;
- Envisager à moyen terme la publication d'un ouvrage de synthèse sur la question du carbone dans un territoire comme la Guyane.

Les principaux résultats issus de la démarche seront :

- La collecte et organisation des données de stocks et de flux de carbone dans une base de données de référence,
- Le suivi quantitatif et spatialisé des changements d'occupation du sol,
- La mise à disposition d'indicateurs synthétiques et d'indicateurs d'action,
- La mise à disposition de cartes et de rapports techniques à usage des acteurs politiques, administratifs et économiques locaux,
- L'organisation de conférences, de tables rondes, de débats sur la question du carbone.

2.2 Négociations climat et mise en œuvre de mécanismes de compensation

L'un des objectifs envisagé in fine de l'observatoire sera la mise en œuvre de processus de compensation des pratiques vertueuses en matière d'économie du carbone. Comme le note le WWF, la Guyane française appartient à la catégorie des zones High Forest-Low deforestation¹ pour lesquels les enjeux en termes de maintien du stock carbone risquent d'être majeurs dans les années à venir.

La Guyane de par les dynamiques démographiques et économiques qu'elle connaît sera amenée dans les années à venir à développer des projets qui seront impactant sur son stock de carbone. Au-delà des besoins nécessaires de développement, les surcoûts liés à la mise en œuvre de pratiques à faible impact génèrera un surcoût. Avec le soutien des partenaires locaux et nationaux ainsi que de l'Union Européenne (en particulier les fonds structurels européens), ces surcoûts pourraient être en partie compensés.

L'entrée dans une économie à faible impact carbone, objectif majeur de l'union européenne pour la période 2014-2020, un outil permettant de connaître et de mesurer les flux et stocks carbone du territoire est une base nécessaire pour mener de manière crédible toute négociation préalable.

Références

Van Kuijk M. 2012.

REDD+ DEVELOPMENTS IN THE GUIANAS The evolution of the concept and activities undertaken in Guyana, Suriname and French Guiana.

ONFI consulté le 29/11/2013 – http://www.onf.fr/presse_medias/++oid++1a3f/@@display_press.html

Plateau des Guyanes, coopération forestière régionale : 1 million d'euros pour contribuer à la réduction des gaz à effet de serre.

Remerciements :

Les remerciements vont à l'ensemble des partenaires ayant soutenu et apporté leur contribution à l'observatoire du carbone et des GES en Guyane, plus particulièrement l'OREDD, les services régionaux concernés, le CIRAD, l'ADEME.



Figure 1. Présentation des partenaires de l'observatoire guyanais du carbone et des GES.

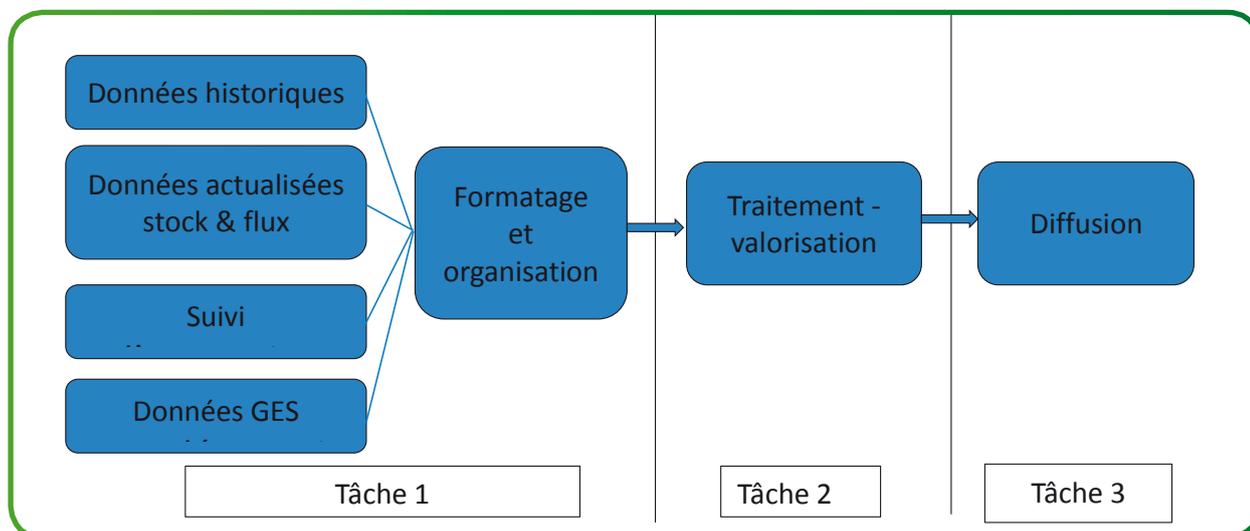


Figure 2. Schéma simplifié du process de traitement des données de l'observatoire guyanais du carbone et des GES.

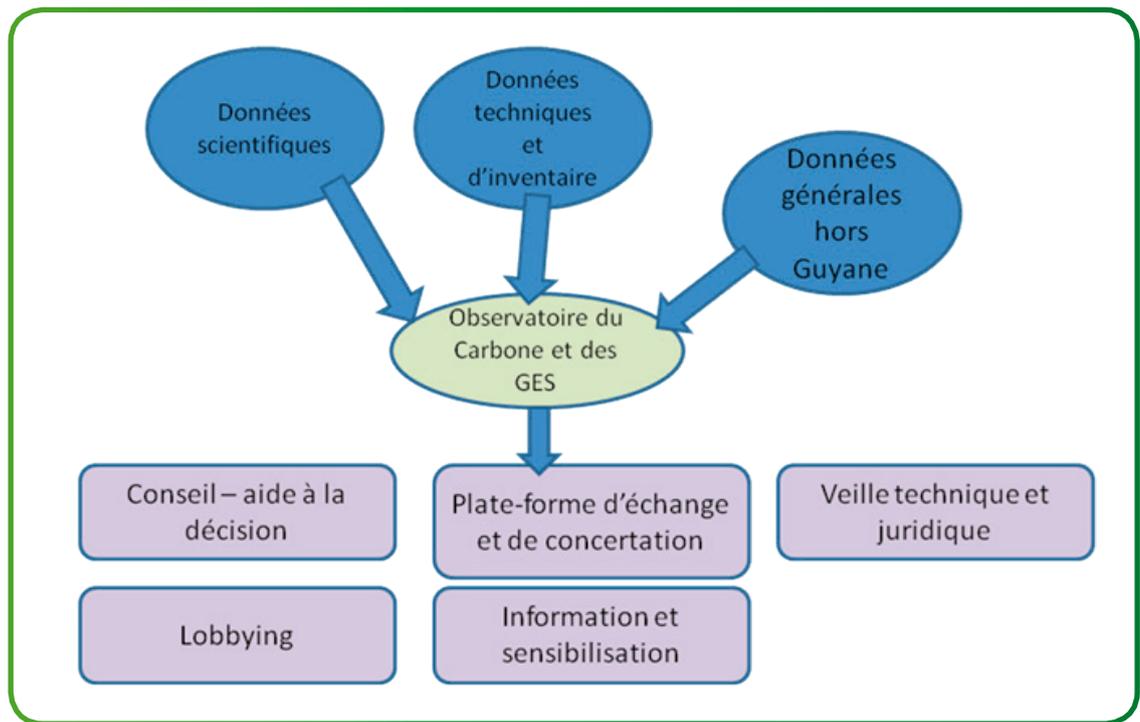


Figure 3. Schéma de fonctionnement et principaux résultats attendus de l'observatoire guyanais du carbone et des GES

La déforestation et le changement d'utilisation des terres en Amazonie brésilienne

BLANC L¹, GRISE M.M.² & de CARVALHO C.R.³

¹Cirad, UR BSEF, CIRAD – Embrapa, Embrapa Amazonia Oriental, Trav. Dr. Eneas Pinheiro s/n^o4, Caixa Postal, 48 Belem, Para - CEP 66095-100, Brésil

² Embrapa Amazonia Oriental Trav. Dr. Eneas Pinheiro s/n^o4, Caixa Postal, 48 Belem, Para - CEP 66095-100, Brésil

³ Embrapa Laboratoire extérieur Europe - Agropolis International, Avenue Agropolis – 34 394 Montpellier - Cedex 5

La déforestation

La déforestation en Amazonie brésilienne est certainement un des enjeux environnementaux les plus emblématiques à l'échelle mondiale. Portée dans l'arène médiatique à partir des années 80, les discours dénoncent une disparition progressive et inéluctable de la plus grande réserve forestière tropicale de la planète.

Les arguments sont centrés, dès le début, sur la perte d'une biodiversité remarquable. Avec l'émergence, dès les années 90, des préoccupations liées aux changements climatiques, ces écosystèmes forestiers seront également progressivement considérés comme un gigantesque réservoir de carbone.

En 2010, 18,2% de l'Amazonie Légale¹⁸ a été déforestée. Les surfaces déforestées sont converties principalement en pâturages pour l'élevage. Alors que les taux de déforestation augmentaient régulièrement depuis les années 80 (Fig. 1), un changement radical se produit à partir de 2005. Sous l'impulsion de l'état fédéral qui mobilise 14 ministères et les différents États amazoniens, un arsenal de mesures est prise avec le plan d'action pour la prévention et le contrôle de la déforestation dans l'Amazonie légale (PPCDAM). Cette volonté politique de stopper la déforestation bénéficie également d'un contexte économique de baisse des prix du soja et de la viande entre 2003 et 2007 (Assunção 2012).

Les mesures d'interdiction de déforester et d'utiliser le feu, associées à des programmes de surveillance satellitaires développés par l'institut national de recherche spatiale (INPE), ont permis de réduire de façon spectaculaire la déforestation à partir de 2005 (Fig. 1). Ainsi en 2012, la déforestation a chuté de 82% par rapport à celle enregistrée en 2005. Les fronts de déforestation auparavant dynamiques se figent progressivement.

Cette transition implique de revoir en profondeur les modes de production agricole, qui ne peut plus se faire par défriche brûlis en avançant sur la forêt. C'est dans cette mosaïque de paysages créés par les fronts de déforestation, désormais en voie de stabilisation, que se situent actuellement les enjeux de production agricole devant être désormais associés aux enjeux de maintien des services écosystémiques. C'est ce double challenge qui est poursuivi par les programmes actuellement mis en place comme le programme d'Agriculture à Basse émission de Carbone³ (programme ABC) basé sur la récupération des pâturages dégradés, les plantations forestières, le semis direct ou encore les modèles intégratif Agriculture - Elevage - Forêts.

Dans cette perspective, il est particulièrement intéressant de diffuser les résultats acquis par le projet CARPAGG (Blanfort et al. 2013, Stahl et al. 2013) et de développer les collaborations de recherche entre la Guyane et le Brésil.

Le changement d'utilisation des terres

La colonisation de l'Amazonie débute dans les années 60. Elle est voulue et soutenue par une politique de l'état fédéral, favorisant la migration de populations vers le nord du pays. Cette colonisation du territoire amazonien s'est faite principalement grâce aux principaux axes routiers qui pénètrent dans le territoire amazonien (Fig. 2). Le premier axe est la route BR 10 Belém-Brasília qui a permis la colonisation du centre et du sud de l'état du Para. Les fronts de déforestation se mettent ainsi en place et progressent des marges du territoire amazonien vers l'intérieur.

Le programme TERRACLASS, réalisé par l'Embrapa et l'INPE, analyse les changements d'utilisation des terres. Le bilan établi en 2010 montre que 18,2 % de l'Amazonie est déforesté soit une surface de 739 672 km². Près de deux tiers de cette surface (61,9 %) a été transformé en pâturages qui sont dans des états de dégradation variables (Tab. 1).

22,2 % de la surface est de nouveau colonisé par la forêt (forêts secondaires). Aguiar (2012)⁴ estime que les taux de déforestation annuelle en Amazonie ont relargué dans l'atmosphère entre 0.15 à 0.28 Pg C an soit jusqu'à un tiers des émissions de carbone à l'échelle de la planète dues au changement d'utilisation des terres.

Hormis les zones agricoles et une partie des pâturages propres, tous les autres stades de cette typologie ne sont pas figés dans le temps mais passent d'un état à un autre en fonction des pratiques de gestion. Une dégradation des pâturages entraîne un recrû forestier qui peut de nouveau être brûlé pour recréer une zone de pâturages). Cette mosaïque de paysages n'est donc pas figée mais évolue constamment dans le temps et dans l'espace.

Il serait toutefois erroné de considérer que la forêt couvrant 81,6 % de l'Amazonie Légale est dans son état originel. Une partie de cette surface, a été dégradée c'est-à-dire a subi une perte de sa capacité à produire des services écosystémiques (stockage carbone, biodiversité, produits forestiers, etc.) suite à des impacts anthropiques.

La dégradation peut être liée à plusieurs causes non exclusives telles que les prélèvements de produits forestiers ou les activités de pâturages, le passage du feu et l'invasion d'espèces. D'après l'INPE, la dégradation forestière n'a pas connu la même décroissance que la déforestation mais reste stable depuis les années 2000. Une meilleure caractérisation de la dégradation forestière et une prise en compte de ses effets dans les bilans carbone (seule la déforestation est jusqu'à présent prise en compte) à l'échelle de l'Amazonie apparaît désormais comme une priorité.

Remerciements

Les coopérations en cours entre l'EMBRAPA et le CIRAD sont réalisés dans le cadre du projet CARPAGG (CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre), cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER PO 2007-2013) et le Cirad.

Références

- Aguiar. 2012. Modeling the spatial and temporal heterogeneity of deforestation-driven carbon emissions: the INPE-EM framework applied to the Brazilian Amazon Global Change Biology, 18(11): 3346–3366.
- Assunção J. 2012. Deforestation Slowdown in the Legal Amazon : Prices or Policies ? Climate Policy Initiative Rio de Janeiro, PUC-RIO, Janeiro 2012.
- Blanfort V, Ponchant L, Dézécache C, Stahl C, Freycon V, Picon-Cochard C, Blanc L, & Fontaine S. 2013. Dynamique du carbone dans les sols de prairies issues de la déforestation de la forêt guyanaise. In : Blanfort V & Stahl C (eds), Actes du séminaire « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 3, 4 p.
- Stahl C, Klumpp K, Falcimagne R, Picon-Cochard C, & BLANFORT V 2013. Flux de C échangés entre l'écosystème prairial et

l'atmosphère en Amazonie française. In : Blanford V & Stahl C (eds), Actes du séminaire « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, 1 octobre 2013. Session 2, 4 p. (Projet CARPAGG).

²Assunção J. *Deforestation Slowdown in the Legal Amazon : Prices or Policies ? Climate Policy Initiative Rio de Janeiro, PUC-RIO, Janeiro 2012.*

³Voir le site du ministère de l'Agriculture du Brésil : <http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimento-sustentavel/plano-abc>.

¹L'Amazonie Légale s'étend sur 9 états brésiliens. Cette division administrative comprend les sept états de la région Nord du pays (Acre, Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia, Roraima et Tocantins) ainsi que deux états du Mato Grosso et une partie du Maranhão. L'ensemble des indicateurs de suivi de la végétation fournis par l'Institut National de recherche spatiale (INPE) fait toujours référence à ce territoire.

⁴Aguiar 2012. *Modeling the spatial and temporal heterogeneity of deforestation-driven carbon emissions: the INPE-EM framework applied to the Brazilian Amazon Global Change Biology, 18(11): 3346–3366.*

Classes	% de la surface déforestée
Pâturages propres	45,8
Pâturages sales	7,6
Pâturages & régénération forestière	8,5
Forêts secondaires	22,2
Agriculture	5,4
Autres (zones urbaines, zones non classées, mosaïques d'occupation, reforestation, mines)	10,5

Tableau 1. Classes d'utilisation des terres en Amazonie Légale après déforestation (Embrapa-INPE, 2013. Levantamento de informações de uso e cobertura da terra na Amazônia 2010).

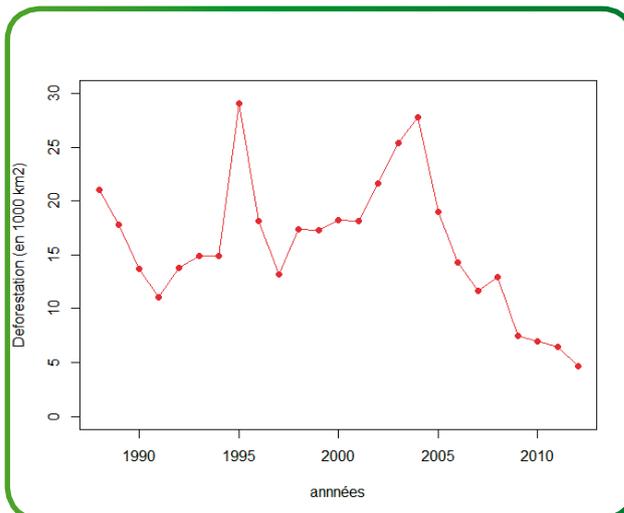


Figure 1. Evolution des surfaces de déforestation annuelles de 1988 à 2012 en Amazonie Légale. Source des données : INPE, programme PRODES, <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>.

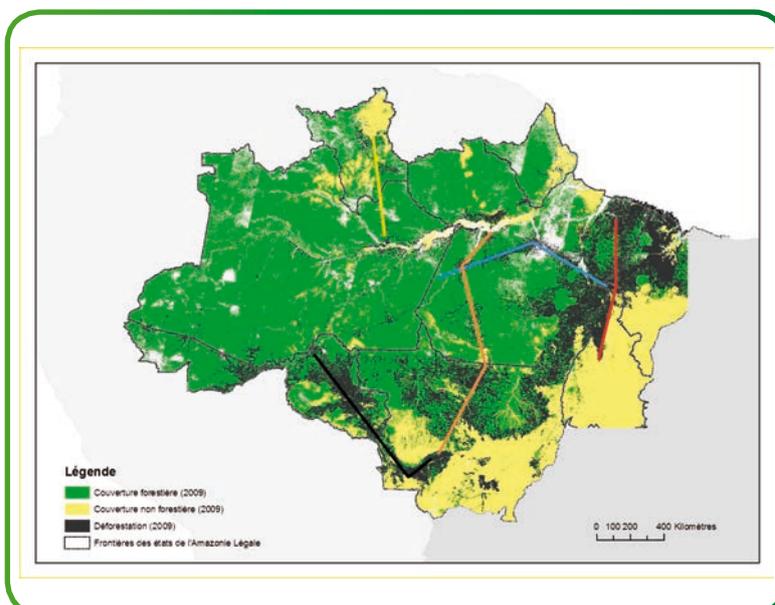


Figure 2. Carte de la couverture végétale en 2009 en Amazonie Légale. Les zones vertes indiquent une couverture forestière, les zones jaunes une végétation non forestière, et les zones grises la déforestation. Les principaux axes routiers sont les routes Belém-Brasília (créée en 1958, en rouge), Cuiabá-Porto Velho (créée en 1968, en noir), Cuiabá-Santarém (en orange), la transamazonienne (en bleu) et Manaus-Boa Vista (en jaune). Extrait et adapté du rapport Imazon, 2010 « fatos florestais da Amazônia 2010 », rapport Imazon, Belém.

CONCLUSION

L'étude des fonctionnements des écosystèmes forestiers et des systèmes prairiaux issues de déforestation,
... pour la production de connaissances génériques (en zones tropicales, en Amazonie),
... vers la réalisation d'outils, de bilans, la mise en place d'un observatoire du carbone et des GES de Guyane,
... pour quels enjeux, quelles perspectives en Guyane ?

Tels peuvent se définir les axes majeurs qui ont structuré la journée consacrée au carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, organisée dans le cadre du séminaire de restitution du projet de recherche CARPAGG « CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre ».

Les interventions et les débats organisés en 4 sessions confirment que le territoire guyanais constitue un environnement scientifique et technique original et reposant sur des dispositifs de recherche et d'observation conséquents, en œuvre sur la forêt depuis plusieurs décennies.

Concernant le carbone, d'autres projets de recherche plus récents s'intéressent de façon complémentaire aux zones déforestées consacrées à l'agriculture. La déforestation pour la mise en place de prairies constitue en effet un changement radical d'usage de la terre qui impacte durablement la production de services écosystémiques, notamment ceux liés au cycle du carbone. C'est l'objet d'étude du dispositif de recherche CARPAGG depuis 2010. L'ensemble de ces dispositifs contribue à la mise en place en Guyane d'une plateforme régionale de recherche sur la question des bilans carbone (C) et gaz à effet de serre (GES) en forêt et sur zones déforestées.

Au-delà de la Guyane, ces recherches ont un caractère générique dans le contexte global du changement climatique et du changement d'utilisation des terres. La session introductive rappelle que la prise en compte des impacts et services liés aux différentes formes d'utilisation et de transformation des forêts tropicales est désormais incontournable en lien avec le développement de l'agriculture, en particulier de l'élevage.

Point central de la journée, les sessions 2 et 3 ont permis aux chercheurs de Guyane et à leurs partenaires scientifiques de présenter des résultats de recherche sur le fonctionnement des écosystèmes amazoniens en se focalisant sur les processus d'entrée et de stockage carbone, les flux de CO₂ et leurs résultantes, les stocks de C.

La dernière session aborde à travers quelques cas la question de l'utilisation de ces références pour la réalisation de bilans C et GES dans divers outils. Elle a débouché sur un débat final où les résultats ciblés sur les processus biologiques et les outils de bilan ont été replacés en regard à des enjeux socio-économiques et réglementaires en Guyane et au Brésil (politique publique, aménagement et gestion du territoire, développement des filières forêts et agricoles, bilan C).

Lors du débat final, il a été souligné que la double appartenance de la Guyane à l'Europe et à la zone amazonienne constitue une opportunité de se positionner comme un territoire emblématique vis-à-vis de l'Europe et de la scène internationale au sein des enjeux actuels sur le développement durable, le changement climatique, la préservation des ressources. La Guyane forme un territoire très particulier où les choix de développement doivent être raisonnés à partir de la préservation d'un écosystème exceptionnel, la forêt tropicale humide et ses réponses à son exploitation et à sa transformation.

La forte accélération de la croissance démographique en Guyane accroît la pression foncière et posent des questions de développement et sur l'exploitation des ressources naturelles du territoire. La mise en place de politiques d'aménagement et de développement du territoire doit s'appuyer sur des références adaptées au contexte local et des outils opérationnels.

Ainsi la recherche a vocation à consolider les stratégies de maîtrise des émissions carbone des activités d'exploitation forestière. Les dispositifs en place sur la dynamique des peuplements naturels et en exploitation constituent des références fondamentales qui doivent être complétées par l'étude des impacts des exploitations sur la dynamique des sols forestiers. La recherche accompagne également l'évolution des itinéraires techniques dans la gestion forestière, et notamment l'exploitation à faible impact. Enfin, les bilans globaux de carbone dans la gestion forestière sont désormais possibles.

La nécessité de mettre en place un contrôle efficace des nouvelles surfaces issues de la déforestation, de leur impact environnemental et de disposer d'outils, de références doit accompagner la mise en place de systèmes agricoles durables et acceptables sur le plan environnemental. Par ailleurs, s'il est indéniable que l'agriculture doit prendre en compte ces nouveaux enjeux dans ses modes de production en Guyane comme ailleurs, les autres secteurs, souvent moins mis en avant, se doivent d'adopter la même attitude. Il a également été rappelé que c'est la déforestation « non productive » qui a l'impact C le plus fort. Quelques objectifs devraient permettre de satisfaire à ces attentes, ils passent par une maximisation des stocks de C, la gestion du C forestier aérien, la prise en compte du C du sol dans les écosystèmes agricoles, et bien sur la substitution du C fossile par d'autres formes d'énergie moins impactantes.

C'est aussi pour mieux répondre à ces préoccupations, qu'a été élaboré **l'Observatoire Guyanais du Carbone et des gaz à effet de serre** dont la mise en place en 2013 a été officiellement annoncé à l'occasion de cette journée par Hélène Sirder, 2ème Vice-présidente de la Région déléguée à l'environnement et au développement durable. L'observatoire soutenu par le Fonds Européen de Développement Régional et le Conseil Régional de Guyane associe dans sa forme actuel des organismes de recherches comme le Cirad, l'Inra et les principaux institutionnels concernés par la question (ADEME, ONF, DAAF, DEAL). A terme il s'agit de fédérer l'ensemble des acteurs du territoire concernés par la question du carbone (utilisateurs et fournisseurs d'informations). Cette structure repose sur un dispositif de collecte et de synthèse des connaissances scientifiques et des informations disponibles. Son objectif est d'accompagner la politique carbone et gaz à effet de serre de la Guyane concernant la gestion des forêts, le développement agricole et l'aménagement du territoire. L'observatoire a une mission d'information, d'aide à la décision et de suivi du changement d'usage des terres dans le cadre du développement territorial de la Guyane.

Au-delà des problématiques territoriales et régionales, l'actualité internationale sur le sujet a également alimenté les débats. Le 5^e rapport du GIEC améliore la certitude concernant notamment les cycles biogéochimiques, les rétroactions climatiques et les variabilités naturelles. Il confirme que le climat répond au forçage anthropique et plus rapidement que prévu. Un rapport récent de la FAO (septembre 2013), intitulé: «Lutter contre le changement climatique grâce à l'élevage: une évaluation globale des émissions et des possibilités d'atténuation» est venu également alimenter le débat très opportunément. L'élevage reste certes un important émetteur de (GES), mais il est confirmé que ce secteur a désormais les moyens de réduire de façon significative ses émissions. La FAO a d'ailleurs revu à la baisse la contribution des filières de production animale aux émissions d'origine anthropique (de 18 à 14.5%). L'élevage pourrait réduire de 30% ses émissions de GES par un plus grand usage de meilleures pratiques agricoles et des technologies existantes, tout en gardant les objectifs de doublement de sa production au sud en lien avec l'augmentation de la demande. En Amazonie, l'expansion en cours des systèmes d'élevage sur la forêt illustre parfaitement ces enjeux globaux. Ce développement doit être accompagné par des recherches génériques sur une gestion durable des pâturages, conciliant production et services environnementaux permettant de préciser les impacts sur l'environnement et de les réduire. Les participants brésiliens à la journée ont rappelé l'immense défi du développement de la région amazonienne (25 millions de personnes) qui doit se baser sur des systèmes efficaces sur le plan de la production et de l'environnement associant l'agriculture à la gestion, et la préservation de la forêt. La coopération Brésil-Guyane en cours entre l'EMBRAPA et le CIRAD prend tout son sens dans ce contexte.

Synthèse et perspectives

Les dispositifs de recherche présents en Guyane offrent la possibilité de traiter ces questions de façon tout à fait complémentaire. L'approche « stock de C » (projet Guyafor et réseau de placettes forestières initiée depuis près de 30 ans en forêt a été récemment complétée par le dispositif Carpagg sur prairies qui a notamment permis de mieux prendre en compte le C du sol. Ces dispositifs présentent donc l'originalité de pouvoir conforter l'approche stock par une approche « flux » des tours à flux existant en forêt depuis 2003 (Guyaflux), et en prairie depuis 2010. La mise en place d'outils intégrant ces références a récemment été initiée par le projet « Guyasim » (outil de simulation des impacts et des services).

L'ensemble montre un effort important de recherches intégrées des organismes présents (Cirad, Inra, CNRS, Agro Paris tech) impliqués dans des projets désormais nombreux. Le cas des recherches sur le C fournit un exemple d'effort de complémentarité, de collaboration avec l'extérieur, d'association de la recherche avec les décideurs, les gestionnaires, sur des questions désormais partagées. Le Cirad Guyane confirme ce positionnement et intègre depuis plusieurs années dans ses axes prioritaires l'étude des impacts et des services écologiques de l'agriculture vis-à-vis de l'environnement. Le projet CARPAGG illustre cette tendance et cette volonté d'accompagner le développement de l'élevage en Guyane dans le contexte de changement d'utilisation des terres tout en contribuant aux questions scientifiques actuelles sur le rôle et les enjeux des écosystèmes pâturés dans le réchauffement climatique.

Liste des intervenants

NOM	PRENOM	ADRESSE	MAIL
BARALOTO (3)	Christopher	INRA, UMR Ecofog, 97310 Kourou, Guyane	Chris.Baraloto@ecofog.gf
BLANC	Lilian	CIRAD, UR BSEF, CIRAD , Embrapa Amazonia Oriental, Trav. Dr. Eneas Pinheiro s/n ^o 4, Caixa Postal, 48 Belem, Para - CEP 66095-100, Brésil	lilian.blanc@cirad.fr
BLANFORT **	Vincent	CIRAD, UMR SELMET ""Systèmes d'Elevage Méditerranéens et Tropicaux " Campus agronomique, Avenue de France - BP 701 97387 Kourou CEDEX France	Vincent.blanfort@cirad.fr
BURBAN	Benoit	INRA, UMR Ecofog, 97310 Kourou, Guyane	Benoit.Burban@ecofog.gf
CARVALHO (4)	Claudio	Embrapa Laboratoire extérieur Europe - Agropolis International, Avenue Agropolis – 34 394 Montpellier - Cedex 5	claudio.carvalho@embrapa.br
DOLLEY	Thomas	CIRAD UMR ECOFOG Bâtiment D TA C-105 / D Campus international de Baillarguet 34398 Montpellier Cedex 5	Thomas.Dolley@cirad.fr
DESCROIX	Laurent	ONF, Pôle Recherche & Développement de Cayenne, Réserve de Montabo BP 7002 97307 Cayenne Cedex	Laurent.Descroix@onf.fr
FALCIMAGNE	Robert	INRA UREP Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial Site de Crouël, 5, Chemin de Beaulieu 63100 CLERMONT-FERRAND - FRANCE	robert.falcimagne@clermont.inra.fr
FONTAINE	Sébastien	INRA UREP Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial Site de Crouël, 5, Chemin de Beaulieu 63100 CLERMONT-FERRAND - FRANCE	Sebastien.Fontaine@clermont.inra.fr
FEIX	Isabelle	ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), Direction Productions et Energies Durables, 20 Avenue du Grésillé - BP 90406 - 49004 Angers cedex 01	isabelle.feix@ademe.fr
GRISE	Marcia	Embrapa Amazonia Oriental Trav. Dr. Eneas Pinheiro s/n ^o 4, Caixa Postal, 48 Belem, Para - CEP 66095-100, Brésil	marcia.grise@embrapa.br
HERAULT (2)	Bruno	CIRAD, UMR EcoFoG, Campus agronomique, 97310 Kourou	bruno.herault@cirad.fr
KLUMPP	Katja	INRA UREP Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial Site de Crouël, 5, Chemin de Beaulieu 63100 CLERMONT-FERRAND - FRANCE	kklump@clermont.inra.fr
LECOMTE (5)	Philippe	CIRAD, Directeur UMR SELMET, Campus international de Baillarguet - TA C-18, 34398 Montpellier Cedex 5, France	philippe.lecomte@cirad.fr
MARCON (6)	Eric	AgroParisTech, Directeur UMR EcoFoG Campus Agronomique 97379 Kourou cedex	Eric.Marcon@ecofog.gf
OULIAC	Benjamin	Stratégie Régionale d'Innovation – Région Guyane - 4179 Route de Montabo – 97300 Cayenne	Benjamin.OULIAC@cr-guyane.fr
PICON-COCHARD	Catherine	INRA – UREP Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial Site de Crouël, 5, Chemin de Beaulieu 63100 CLERMONT-FERRAND - FRANCE	catherine.cochard@clermont.inra.fr
SIRDER (*)	Hélène	2 ^{ème} Vice-Président de la Région Guyane – Présidente de l'OREDD	secretariat.cabinetsirder@orange.fr
STAHL **	Clément	CIRAD, UMR SELMET " Systèmes d'Elevage Méditerranéens et Tropicaux " Campus agronomique, Avenue de France - BP 701 97387 Kourou CEDEX France	clement.stahl@ecofog.gf

- (*) Discours d'ouverture
 (1) Modérateur session 1
 (2) Modérateur session 2
 (3) Modérateur session 3

- (**) Organisateur de la journée
 (4) Modérateur session 4
 (5) Animateur débat final
 (6) Synthèse de la journée

Liste des participants

NOM	PRENOM	ORGANISME
Adam	Miplande	EIE du PNRG
Amusant	Nadine	Cirad
Andrzyauski	Clément	master EFT
Baraloto	Christopher	Inra
Bazile	Dioner	Conseil Général
Billard	Aurélie	Ademe
Blanc	Lilian	Cirad
Blanfort	Vincent	Cirad
Brochet	Anselme	PNRG
Buffard	Franck	ETVM
Buffard	Frédéric	Ikare
Burban	Benoit	inra
Carvalho	Claudio	Embrapa Labex
Casanova	Laurent	Ademe
Catalano	Sébastien	Ademe
Chenut	Guillaume	Daaf
Claudel	Dominique	Ademe
Courtiade	Pierre	Ademe
Dalle	Julie	Daaf
Descroix	Laurent	ONF
Falcimagne	Robert	inra
Feix	Isabelle	Ademe
Fontaine	Sébastien	inra
Fournier	Didier	DRRT
Ganivet	Elias	master EFT
Garcia	Romain	Cirad
Gaspard	Romain	master EFT
Girault	Rémi	Sépanguy
Goret	Jean-Yves	inra
Grise	Marcia	Embrapa
Hérault	Bruno	cirad
Ho Jean Choy	Mylène	Deal
Klumpp	Katja	inra
Koese	Martinus	Cirad
Kozon	Isabelle	master EFT
Kwasie	Fritz	Cirad
Lecomte	Philippe	Cirad
Lecurieux	Louise	Région
Marcin	Mélina	Oredd
Marcon	Eric	UMR ecofog
Marteau	Catherine	Cirad
Montigny	Claire	master EFT
Morisseau	Sylvain	Ademe
Munsch	Julie	Scebog
Neron	Karine	Région
Ngwete	Onofe	Cirad
Oleszak	Johanna	Sgrad-De
Ouliac	Benjamin	région
Palladin	Pierre	adema
Payet	Fanny	Eplefpa
Picon-Cochard	Catherine	inra
Pons	Suzanne	Ademe
Roggy	Jean-Christophe	inra
Roumazeilles	Maxime	master EFT
Roussel	Jean-Romain	master EFT
Sagne	Marc	CR
Simoneau	Jean-Claude	Conseil cabinet président région
Sirder	Hélène	2ème Vice-Président de la Région Guyane
Stahl	Clément	Cirad
Taberlet	Florent	wwf
Thevenin	Jean-marc	Correspondant régional du CIRAD Guyane
Vazquez	Vincent	Ikare

Remerciements

Nous remercions pour leur soutien au projet CARPAGG, à l'organisation de la journée « carbone » et à la publication de ces actes :

Philippe Lecomte, directeur de l'UMR Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux.

La direction du département Environnements et Sociétés du Cirad.

La Direction régionale Cirad Antilles-Guyane (Jean-Marc Thévenin, Jean-Marc Deboin, Dominique Martinez).

Nous remercions pour leur appui au montage et participation au projet CARPAGG de leurs équipes :

Direction de l'Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial INRA Clermont Ferrant (Jean François Soussana et Pascal Carrère).

Direction de l'Unité de Recherche Zootechnique INRA Guadeloupe (M Boval, H Archimède).

Direction de l'UMR EcoFoG (Eric Marcon).

Nous remercions les services d'appui de la Direction régionale Cirad Antilles-Guyane (Catherine Marteau, Romain Garcia, Karine Moreau, Sandra Edouard) ; de l'UMR SELMET Cirad Montpellier (C Chaillan) et du département Environnements et Sociétés du CIRAD (Brigitte Pogam).

Nous remercions Bruno Hérault pour son appui à l'organisation de la journée carbone et à la publication de ces actes.

Nous remercions La Région Guyane pour son soutien au Projet CARPAGG et l'accueil de l'évènement dans ses locaux.

Nous remercions les intervenants et modérateurs qui ont contribué à animer la journée carbone et à la réalisation de ces actes, leurs noms figurent dans la liste des participants.

Le projet CARPAGG est avant tout un travail collaboratif qui associe différentes équipes et partenaires que nous remercions chaleureusement d'avoir contribué à nos recherches :

- INRA UREP Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial de Clermont Ferrand (Juliette Bloor, Olivier Darsonville Robert Falcimagne, Sébastien Fontaine, Katja Klumpp, Catherine Picon Cochard, Sandrine Revaillet) ;

- INRA URZ Unité de Recherche Zootechnique, Guadeloupe (Maryline Boval) ;

- CIRAD (B&SEF, Lilian Blanc, Vincent Freycon, Vivien Rossi) ;

- CIRAD SELMET (Elodie Baby, Laurent Bonnal, Jean Marie Capron, Johann Huguenin, Lionel Julien, Philippe Lecomte) ;

- UMR EcoFoG ECOlogie des Forêts de Guyane (projets GUYAFOR, GUYASIM : Bruno Hérault, GUYAFLUX : Damien Bonal, Benoit Burban, Jean-Yves Goret).

Les exploitants qui hébergent nos dispositifs de mesures dans leur exploitation d'élevage ont un rôle de coopération essentiel : M et Mme Bergère (Bio Savane Sinnamary), M et Mme Mornand et associés, Camille Chaix/ Elsa WETTA (ETVM Macouria).

Les exploitants ayant accueilli l'étude sur la chronoséquence (M. Chrisan Araujo, M. et Mme Burban, M. Melchiade Dolor, M. Maurice Porrineau, M. Alex Rimbaud, M Giraud-Audine, M Lychao, M yahu, M Yamo).

Enfin nous tenons à exprimer notre amicale gratitude à « l'équipe CARPAGG » dont la composition a évolué depuis la mise en place du projet début 2010 :

- Abner Etienne, Martinus Koese, Fritz Kwasié, Guy François, Stéphane Molinier, Onoefe Ngwete (collaborateurs Cirad) ;

- Camille Dezechache, Mélanie Jobin, Lise Ponchant, Pierre Therriot (stagiaires).

La journée « le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives », organisée dans le cadre de la restitution du projet de recherche CARPAGG « CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre », s'est structurée autour de 4 axes majeurs :

L'étude des fonctionnements des écosystèmes forestiers et des systèmes prairiaux issues de déforestation...
... pour la production de connaissances génériques (en zones tropicales, en Amazonie),
... vers la réalisation d'outils, de bilans, la mise en place d'un observatoire du carbone et des GES de Guyane...
... pour quels enjeux, quelles perspectives ?



Avec le concours de



IKARE, EMBRAPA Amazonia Oriental Belem, SCEBOG

Retrouvez le dispositif CARPAGG sur :
UMR-selmet.cirad.fr
antilles-guyane.cirad.fr