



JUIL.
2018

STOCKS DE CARBONE DES SOLS DE GUYANE : MESURE ET DISTRIBUTION 2016-2018

CarSGuy

Rapport final

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :



REMERCIEMENTS

Pierre Courtiade (ADEME)
Thomas Eglin (ADEME)
Claudy Jolivet (INRA)

CITATION DE CE RAPPORT

Michel Brossard, Bernard Barthès, Anne-Sophie Perrin, Amandine Courte, Kenji Fujisaki, Ernest Kouakoua, Aurélie Cambou, Patricia Moulin, Eric Beaucher, Max Sarrazin.
2018. Stocks de Carbone des sols de Guyane : mesure et distribution.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1560C0011

Étude réalisée par Michel Brossard, Amandine Courte, Bernard Barthès, Kenji Fujisaki, Max Sarrazin, Éric Beaucher, Patricia Moulin (IRD), Anne-Sophie Perrin (Terres Inovia) pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Brossard Michel
Appel à projet de recherche : REACTIF2

Coordination technique - ADEME : BISPO Antonio & EGLIN Thomas, Ingénieurs "Sol et Environnement"
Direction/Service : Direction Productions et Energies Durables - Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	4
1. Contexte général.....	5
<i>Contexte environnemental et enjeux économiques et sociétaux.....</i>	<i>5</i>
<i>Positionnement du projet.....</i>	<i>6</i>
2. Méthodologie.....	7
<i>Structuration du projet.....</i>	<i>7</i>
<i>Le milieu et les stocks de carbone.....</i>	<i>7</i>
<i>Mesures des stocks de carbone total des sols.....</i>	<i>9</i>
<i>Mesure du devenir du stock de carbone d'un site suite à la déforestation ménagée.....</i>	<i>18</i>
<i>Prédiction des stocks de C du sol par SPIR de terrain, sur carottes prélevées à la tarière à main (StockSpir).....</i>	<i>24</i>
3. Résultats.....	27
<i>Inventaire des stocks de carbone.....</i>	<i>27</i>
<i>Prédiction de stocks de carbone sur le moyen et le long terme.....</i>	<i>37</i>
<i>Mesure du devenir du stock de carbone d'un site suite à la déforestation ménagée.....</i>	<i>41</i>
<i>Prédiction des stocks de C du sol par Spectrométrie Infra-Rouge (SPIR) de terrain, sur carottes prélevées à la tarière à main (StockSpir).....</i>	<i>47</i>
4. Valorisation et diffusion.....	54
5. Recommandations.....	54
6. Conclusion / Perspectives.....	55
Références bibliographiques.....	56
Index des tableaux et figures.....	59
Sigles et acronymes.....	61

Résumé

L'application de la connaissance des services écosystémiques rendus par les sols passe par leur meilleure connaissance dans des contextes divers. La Guyane se caractérise par une situation géographique et politique particulière. La Guyane cherche à allier un développement local à un maintien des services environnementaux rendus par les écosystèmes. La déforestation, lorsque pratiquée hors de cahiers de charges bien établis, conduit à la destruction partielle ou totale de l'horizon de surface des sols, donc au principal réservoir de carbone (C) des sols.

La connaissance actuelle du carbone des sols de Guyane est limitée. Les données collectées ici permettent d'approcher la spatialisation des contenus de C même si la variabilité des stocks reste forte. Les modélisations du devenir des stocks de C suite à la déforestation ont été réalisées à partir des données collectées dans le projet CARSGUY et le site expérimental de Terres Inovia ; s'ajoutent à ces valeurs la compilation de données issues de campagnes précédentes : Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) et ValSol. Ces modélisations indiquent l'importance de la prise en compte du stock initial (T0) pour le devenir des stocks.

Enfin ce travail a testé une méthodologie de mesures spectrales (visible et proche infra-rouge) de terrain des sols pour l'évaluation du stock.

Les données collectées à partir de 236 sites permettent de quantifier et spatialiser les stocks (0-0,3/0-0,5/0-1 m). Ainsi, la couche de 1m contient 81,74 Mg ha⁻¹ (soit 81,74 tC ha⁻¹), avec une grande variabilité (42 à 246 Mg ha⁻¹) ; la couche 0-0,3 m contient 66,46 Mg ha⁻¹. Le stock de la couche 0-0,3 m du territoire représenterait environ 15 % du stock des sols de France (hors DROM et COM) sur la même épaisseur, soit ~0,5 PgC (ou MtC). La modélisation permet de constater que la mise en culture induit de fortes baisses des stocks, 16 % du stock initial à court terme (~ année) après défriche. L'essai expérimental du site de Combi, montre que les stocks ont tendance à croître avec la mise en place d'une prairie de fauche intensive (*Urochloa ruziziensis*). Enfin, l'étude méthodologique de mesure du stock par spectroscopie-spectrométrie sur le terrain n'a pas été concluante, car testée sur un échantillon à forte diversité pédologique.

ABSTRACT

Implementation of ecosystem services knowledge rendered by soils needs to better know their evolution in various contexts. French Guyana is characterized by a particular geographical and political situation. French Guyana seeks to combine local development with the maintenance of environmental services rendered by ecosystems. Deforestation, when practiced outside well-established specifications, leads to the partial or total destruction of surface layers of soils, hence the main carbon reservoir of soils.

Current knowledge of soil carbon in French Guyana is limited. The data collected during this study allowed to map C contents even if the inventory variability remains strong. Modelling the C-stocks future, following deforestation was carried out using data collected in the CARSGUY project and the experimental site of Terres Inovia; in addition to these values we added the compilation of data from previous campaigns: RMQS and the ValSol data base. These models show the importance of taking the time zero (initial C stock) into account for the determination of C-stocks dynamics.

Finally, this work tested a field methodology of spectral measurements (visible and near-infrared spectroscopy) of soils for C stock evaluation.

The data collected from 236 sites make possible the quantification and the mapping of stocks (0-0.3 / 0-0.5 / 0-1 m). Thus the 1m layer contains 81.74 Mg ha⁻¹, with great variability (42 to 246 Mg ha⁻¹). The stock of the 0-0.3 m layer of the territory represents about 15 % of the soil C stock of France. The modelling shows that cultivation induces sharp declines in C stocks, 16% of the initial stock in the short term (~year) after clearing. Experimental testing of the Combi site shows that stocks tend to grow with an intensive mown meadow. Finally, the methodological study of stock measurement by spectroscopy-spectrometry in the field was not conclusive because it was tested on a sample with a high pedological diversity.

1. Contexte général

Contexte environnemental et enjeux économiques et sociétaux

Le stock de carbone et la matière organique du sol sont le résultat de mécanismes naturels et anthropiques de fonctionnement du sol qui expriment un équilibre entre les apports, restitutions aériennes et souterraines, et les pertes, décomposition et transfert. Toute modification du mode d'occupation et de gestion du sol se traduit par des modifications des stocks de carbone, et en général lorsqu'il y a pertes ou décroissance du stock, il est observé que le processus d'accumulation du carbone du sol est plus lent que le mécanisme de diminution. De plus, ces modifications entraînent des effets considérables sur les propriétés du sol, souvent rapidement négatives en particulier dans les zones tropicales. La gestion des sols, qui est au centre d'enjeux environnementaux, est un élément clé dans le cadre des politiques d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques et de sécurité alimentaire (FAO, 2015).

La problématique des changements globaux est devenue un enjeu majeur avec à terme de fortes implications environnementales, sociétales et économiques. La déforestation et la dégradation des forêts tropicales sont responsables de près de 11% des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) (GCP, 2012). La France s'est engagée vis-à-vis de la Convention-cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) à stabiliser ses émissions de GES par rapport à 1990. Récemment, la CCNUCC a mis l'accent sur les efforts de réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des sols, qui comprend la réduction des émissions causées par le déboisement et la dégradation des forêts, la conservation, la gestion durable des forêts et l'amélioration des stocks de carbone, ainsi que des principes de sauvegardes pour l'initiative (REDD+) (FAO, 2011). Les superficies forestières ont reculé en Amérique centrale et du Sud au cours des deux dernières décennies, la cause principale de la déforestation étant la conversion des forêts en terres agricoles (FAO, 2011). En Guyane française, la forêt sous climat tropical humide couvre près de 80 % du territoire dont 99 % est du domaine privé de l'état et donc gérée par l'Etat. La forte croissance démographique (4% par an entre 1999 et 2006, INSEE 2010), et économique (PIB +3.9%/an entre 1993 et 2006, CEROM, 2008) accentue la pression anthropique s'exerçant sur le territoire. D'après une étude réalisée par l'Institut Forestier National et l'Institut de recherche pour le développement (IFN, 2009a et b), les flux annuels forêt/non forêt ont fortement augmenté entre les périodes 1990-2006 (3500ha/an) et 2006-2008 (5900ha/an) (IFN, 2009a et b). Parmi ces flux la conversion des forêts en zones de culture se serait accrue de près de 1500ha/an à environ 2700ha/an entre ces deux périodes (IFN, 2009a et b). Et ce processus va s'accroître vu les objectifs de sécurité alimentaire et énergétique visée par la Collectivité territoriale d'ici à 2030.

La méthode la plus couramment employée actuellement en Guyane française pour le déboisement de nouvelles zones de forêt est l'abattage des arbres à la main, au bulldozer ou à la pelle mécanique suivi du brûlis des troncs et résidus végétaux. Aujourd'hui, en Guyane, 95% de la biomasse forestière est brûlée sur le site de déforestation, avec une valorisation très restreinte limitée au bois d'œuvre (rapport ONF-CIRAD, 2007). Ces pratiques provoquent une dégradation de l'horizon superficiel des sols, déjà intrinsèquement très fragile et peu fertile en plus de rejets atmosphériques considérables de gaz effet de serre. En 2009 en Guyane, il a été estimé que le changement d'affectation des terres représentait 47% du bilan de GES régional (PRME, 2012).

Il convient ainsi de trouver les meilleurs compromis en termes de développement sur le plan social, économique et environnemental. Pour la gouvernance de leur territoire, les décideurs guyanais doivent veiller à ce que le développement agricole et urbain associe des méthodes de déboisement limitant les impacts sur l'environnement (notamment en préservant les services écosystémiques rendus par les sols) et les émissions de GES du territoire, et s'attacher à mettre en place des systèmes de productions agricoles durables dans une optique d'atténuation du changement climatique. Le Plan Énergétique Régional PER (2004) prévoit le recours à la biomasse (bois/énergie) pour la production d'électricité en substitution au fioul lourd et pour faire face à la pénurie énergétique prévue pour le territoire guyanais. Un aménagement concerté permettrait de répondre aux demandes de terres par les jeunes agriculteurs et en contribuant à un approvisionnement régulier en biomasse pour les exploitants de centrales (ADEME, 2009). Le Schéma d'Aménagement Régional envisage à court terme le développement de zones agricoles

regroupées dans des Zones d'Aménagements Agricoles Concertées (ZAAC) (PRME, 2011, 2012) et des PAS (Périmètres d'attribution Simplifiés). Le développement d'une filière bois/énergie en parallèle à l'installation des nouvelles zones agricoles permettrait une diminution des émissions de gaz à effet de serre du territoire (Pinta, 2005 ; ADEME, 2009). Cependant cette baisse se base seulement sur la diminution de la technique du brûlis pour valoriser le bois, au lieu de le brûler sur la parcelle déboisée, et sur l'amélioration de la combustion du bois en conditions contrôlées des chaudières d'usine ainsi que la substitution de l'énergie produite au fioul lourd des centrales actuelles (ONF/CIRAD, 2007).

L'impact de la déforestation sur les stocks de carbone du sol et sur les émissions de GES par les sols n'est pas évalué car il reste encore mal connu (ADEME 2009). Les rejets de GES par les sols après le déboisement sont susceptibles d'être significatifs. Ne pas prendre en compte les sols dans les émissions totales liées à la déforestation risque de sous-estimer les émissions (ex. Grassi *et al.*, 2008). Par ailleurs, l'évolution du stock de carbone des sols après déforestation dépend des techniques de mise en valeur des terres. L'agriculture de conservation, qui est notamment basée sur le semis direct et la couverture permanente du sol, devrait limiter la diminution du stock de C du sol. Il convient donc de mettre au point les techniques d'agriculture de conservation dans les conditions guyanaises et de mesurer l'évolution du stock de C du sol en fonction du mode de mise en valeur des terres déforestées.

Positionnement du projet

Les projets de recherche menés en Guyane française portent en majeure partie sur les écosystèmes naturels exceptionnels que sont la forêt, les milieux littoraux dont la mangrove. Le réseau GUYAFOR notamment (CIRAD, CNRS & ONF) est un réseau de 12 dispositifs forestiers permanents (installés pour certains depuis 1970 comme Paracou) dédié à l'étude à long terme de la dynamique forestière et de la biodiversité et visant notamment à étudier le cycle du carbone de la biomasse aérienne vivante. En revanche, les milieux anthropisés ont été peu étudiés en Guyane française. Des recherches ont été menées sur l'étude des impacts du barrage de Petit-Saut entre 1991 et 2005 (ex. Galy-Lacaux, 1997). Sur le sujet du déboisement et de agriculture/foresterie, dans les années 80 un vaste programme (opération ECEREX 1979-1987 ; Sarrailh, 1980, 1984, 1987) a été initié en parallèle du plan vert (Vivier *et al.* 1995). Ce programme a porté sur l'effet du déboisement mécanique avec brûlis et l'implantation de prairies et d'essences à croissance rapide (pins et eucalyptus).

Deux projets de recherche liés à l'anthropisation ont également été réalisés en Guyane. Le projet CARPAGG « Carbone des pâturages de Guyane et gaz à effet de serre » (financement FEDER) (2009-2012) mené par le CIRAD (UMR Systèmes d'élevage en milieux méditerranéens et tropicaux- Selmet) a eu pour objectif d'évaluer les capacités de stockage de carbone par les prairies installées après déboisement avec brûlis en Guyane. Le projet GuyaSim (financement FEDER 2011-2013) a réuni les résultats acquis notamment dans le cadre du réseau GUYAFOR et de CARPAGG. Dernièrement, 2018, le GEC (Guyane Énergie Climat, structure associée à la Collectivité territoriale) a été dissous, la question de la pérennité des données sur le carbone au niveau régional est posée.

Le projet CarSGuy, visant à mieux mesurer et modéliser les stocks de carbone dans les sols de Guyane, leur distribution et leur évolution suite à de la déforestation, se pose comme préalable à une meilleure gestion des sols et à la prise en compte de services écosystémiques qu'ils rendent. L'application de la connaissance des services écosystémiques passe en effet par leur meilleure connaissance dans des contextes divers. La Guyane se caractérise par une situation géographique et politique particulière : c'est une région-département français enclavé dans le continent sud-américain ; c'est un biome amazonien sur des sols développés sur l'ensemble géologique Précambrien dans la plus grande partie du territoire ; c'est un territoire sous-peuplé mais à forte croissance démographique récente, depuis peu le centre d'une demande de développement agro-pastoral, urbain et minier. La Guyane cherche à allier un développement local à un maintien des services environnementaux rendus par les écosystèmes. Le territoire est caractérisé par l'appartenance de la majeure partie des terres à l'état, la mise en place d'un parc national découpant le territoire en divers régimes de gestion, s'y ajoutent de multiples réserves naturelles et de Znieff (zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique). La déforestation, lorsque pratiquée hors de cahiers de charges bien établis, conduit à la destruction partielle ou totale de l'horizon de surface des sols, donc au principal réservoir de carbone des sols.

La connaissance actuelle du carbone des sols de Guyane est limitée. Les données disponibles ne permettent pas la spatialisation des contenus de C même si une vision des teneurs peut être renseignée. Le contexte pédologique et climatique est contraignant pour le développement agro-pastoral. Les données disponibles au niveau du bassin amazonien ne sont pas uniformes au point de donner de grandes règles du devenir des stocks-C suite à la déforestation : les données sont très limitées sur les alternatives de techniques de déforestation à l'abattis-brûlis ; si des travaux en cours peuvent montrer qu'il est possible de séquestrer du C avec des pâturages, les données sur les effets des modes de gestion et les stocks sont peu expressives, sauf des tendances sous pâturages extensifs ; nous ne disposons pas de données sur des sols développées sur les matériaux du socle Précambrien, l'extension la plus importante du territoire guyanais, mais essentiellement sur les sols issus des alluvions du Tertiaire à l'Holocène du Brésil.

Aussi, nous avons a) quantifié et spatialisé les stocks de C des sols sur le territoire concerné par les pressions actuelles ou d'un futur proche (bande côtière prenant en compte des terres sur le socle Précambrien, $\pm 13\%$ du territoire), b) poursuivi l'analyse engagée sur le devenir du C du sol suite à une méthode originale de déforestation dans un site expérimental cultivé, c) fait une analyse méthodologique de la possible application de mesures spectrales des sols pour l'évaluation rapide du stock de C *in situ*.

2. Méthodologie

Structuration du projet

Le projet est structuré en quatre actions. La première vise à mesurer et tenter de spatialiser les stocks de carbone sur une partie du territoire ; la seconde s'attache à simuler le devenir des stocks à moyen-long terme à partir de sites inventoriés ; la troisième propose les résultats acquis sur un site expérimental suite à une déforestation et mise en culture depuis neuf années avec en particulier les dernières acquisitions d'évolution des stocks ; enfin une approche méthodologique a été engagée pour la prédiction des stocks de carbone par spectroscopie-spectrométrie de terrain. Ce chapitre présente les démarches et les méthodes qui sont associées.

Le milieu et les stocks de carbone

Le territoire de la Guyane est très étendu, 84 850 km² (83 534 km² terres fermes), et situé par 4° de latitude nord et 53° de longitude ouest. Trois éléments généraux doivent être pris en considération concernant les stocks de carbone des sols : la géologie et l'âge des formations superficielles, le climat et la végétation.

Géologie et l'âge des formations superficielles : 90 % des roches en Guyane ont un peu plus de 2 milliards d'années. Ainsi, mis à part les formations « récentes » Cénozoïques sédimentaires du littoral, tous les matériaux qui se sont altérés et qui s'altèrent pour donner la couverture pédologique sont Paléo-protérozoïques. A partir de – 65 MA le bouclier des Guyanes se soulève et une intense altération se produit. Elle se poursuit et elle va donner les caractéristiques morpho-pédologiques aujourd'hui observées, les cuirassements les plus jeunes sont datés d'il y a 8 MA. En d'autres termes, l'ensemble des sols sur le socle est formé sur des altérations anciennes dans un domaine relativement stable depuis le milieu du Miocène. La grande variabilité des formations superficielles sera liée aux conditions géomorphologiques actuelles et sub-actuelles qui font la diversité pédologique. Nous reviendrons sur ce point lors de la présentation des stocks de carbone dans les paysages morpho-pédologiques.

S'agissant du climat, dans cette partie du biome amazonien le climat est tropical humide (Af et Am selon la classification Köppen-Geiger, Peel et al., 2007), avec une température moyenne de 26°C qui varie annuellement peu. Le gradient de précipitations en Guyane, montre une pluviosité plus faible au nord-ouest (1700 mm) et plus élevée au sud-ouest de Cayenne (3500 mm), les précipitations sont plus faibles à l'intérieur des terres que sur la bande côtière. Les saisons sont régulées par les mouvements de la Zone Intertropicale de Convergence (ZIC) qui oscille entre le nord et le sud de l'équateur. On distingue deux saisons sèches, une première assez courte

généralement en mars (la ZIC se trouve alors sur l'équateur) appelée « petit été de mars », et une plus longue d'août à novembre (la ZIC se trouve alors à une latitude de 10°N). L'humidité relative de l'air varie en moyenne de 82 % en septembre à 88 % en juin. La saisonnalité est parfaitement observée dans les sols comme en attestent les relevés suivants (Fig. 1) du pédoclimat. Les relevés en continu sous forêt correspondent aux valeurs ponctuelles relevées dans les années 60' par Lévêque (1967). La forêt exerce un effet tampon efficace face aux radiations et maintient la température constante très voisine de 25°C dans l'horizon superficiel du sol. Toutefois, la figure illustre bien que tout changement d'usage de terres, en particulier après coupe à blanc et installation agricole, conduit à un réchauffement notable du sol, et que même les couvertures pérennes de poacées fortement productives ne peuvent le diminuer significativement.

Le devenir de la pluie incidente est aussi fortement liée à la couverture, mais surtout il va structurer la teneur en eau volumique du sol : bien que la saisonnalité des pluies soit bien marquée sur l'eau du sol, le couvert forestier maintient bien des teneurs en eau favorables à l'activité biologique, sauf pendant deux à trois mois (forte variabilité interannuelle). Il faut tempérer cette remarque en signalant que la porosité des sols va jouer localement, tout comme la position morpho-pédologique (nature du drainage, bloqué, latéral, vertical libre, Boulet et al., 1993). **En résumé, le devenir des restitutions organiques des sols est fortement soumis à un potentiel d'activité biologique élevé, pouvant selon le contexte local, dont pédologique, être en « dormance » lorsque la saison sèche est bien marquée.**

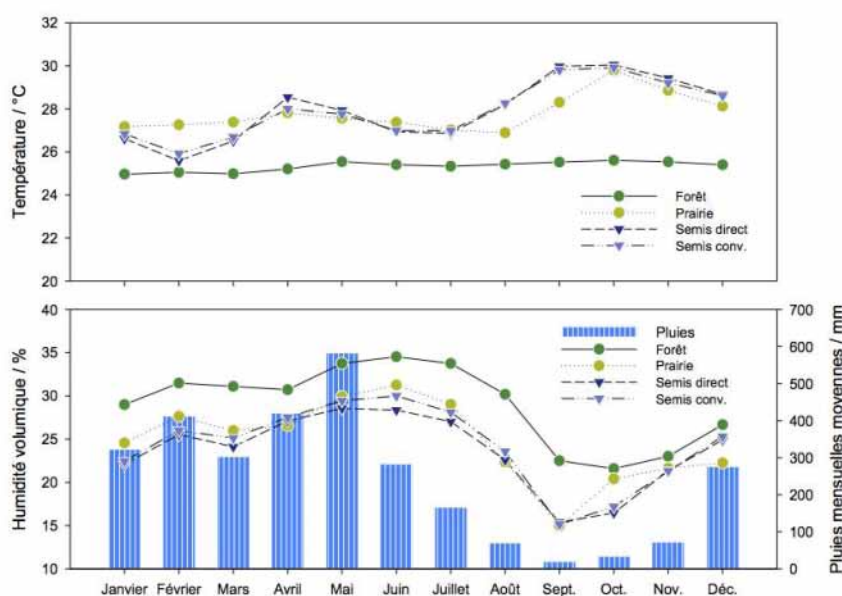


Figure 1 - Température du sol (couche 0-0,1m), humidité volumique du sol (couche 0-0,2m) et pluviométrie enregistrée sur le site de Combi (moyenne 2011-2013, données CETIOM – Terres Inovia) (Fujisaki, 2014; Fujisaki et al., 2017)

La végétation source de carbone : Diversité spécifique et grande variété d'habitats sont des particularités de la forêt guyanaise, comme l'illustre le dernier catalogue de Guitet et al., (2017). Forêts marécageuses, forêts des plateaux et hauts reliefs, forêts des collines, forêts des plaines et dépressions résument cet ensemble. Un premier travail entre botanistes et pédologues (Sabatier et al., 1997) soulignait l'étroite relation entre sol et végétation. Mais reprenons les termes de Guitet et al., qui soulignent bien la relation avec le sujet qui nous intéresse : « En Guyane, de nombreuses études se sont particulièrement attachées à décrypter les relations entre sol et végétation. Toutes ces études mettent en évidence l'importance de la qualité du drainage sur la composition mais aussi sur la structure et la dynamique de la forêt. Elles démontrent une différenciation nette entre forêts marécageuses des bas-fonds sur sols hydromorphes, plus riches en espèces héliophiles et en monocotylédones (Granville, 1984) du fait d'une dynamique plus rapide, et forêts de terre ferme aux sols mieux drainés, à la canopée plus fermée et à la dynamique plus lente (Ferry et al., 2010). Elles pointent aussi des différences de composition plus subtiles entre les sols de terre ferme à drainage profond et ceux à drainage latéral ou superficiel (Morneau, 2007 ; Coutron et al., 2003). La profondeur de sol montre aussi une influence forte sur la structure du peuplement avec une canopée

plus basse et des diamètres plus faibles sur les sols minces (Sabatier et al., 1997 ; Paget, 1999) ». La relation entre la diversité des arbres, les caractéristiques géomorphologiques et la pluviométrie à l'échelle du territoire viennent d'être statistiquement soulignées (Guitet et al., 2018). La biomasse aérienne est mesurée entre 300 et 350 MgMS.ha⁻¹ (Puig et al., 1990 ; Baraloto et al. 2011 ; Guitet et al., 2006) ; rapporté au carbone nous sommes dans une fourchette de 140 à 180 MgC.ha⁻¹ selon la teneur en carbone considérée pour les bois. Fanin et al. (2011) montrent que la diversité des essences forestières induit une variabilité spatiale de la composition et de la quantité des litières, qui se répercute sur la respiration du sol. Bréchet (2009) estime à 4,6 tC.ha⁻¹ les litières et à 6,4 tC.ha⁻¹ les racines dans la couche 0-0,15 m, Fujisaki et al., (2017) à 7,08 tC.ha⁻¹ les racines de la couche 0-0,3 m. **En résumé, le lien entre les spécificités de la forêt et le fonctionnement hydrodynamique des sols est étroit, les stocks épigés de carbone sont en première approximation proches de ce que nous observons sur les sols d'autres régions similaires.**

Mesures des stocks de carbone total des sols

Description du jeu de données

L'échantillonnage est constitué par 236 sites de mesures (Fig.2) : deux axes d'acquisition reposent sur des campagnes de terrain récentes, celle du présent projet CarSGuy et celles du Réseau de mesure de la qualité des sols en Guyane, et le troisième axe valorise des données anciennes. Les sections suivantes en précisent le contexte méthodologique.

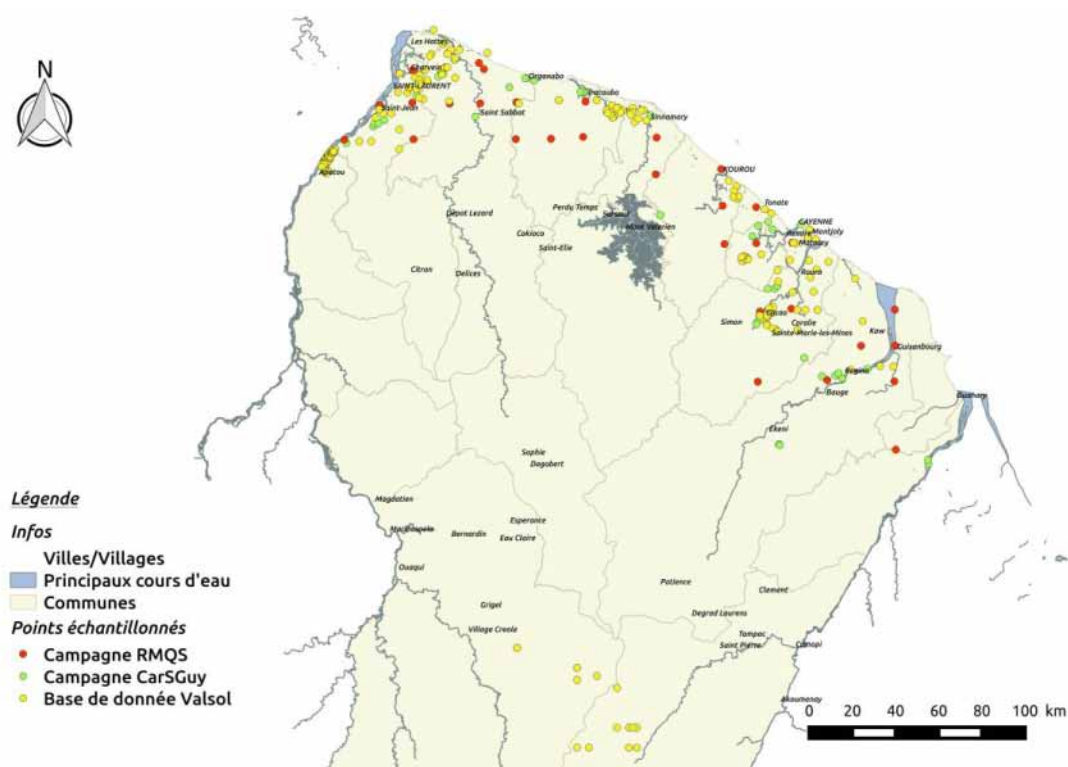


Figure 2 – Carte de localisation des sites de prélèvements avec stocks de carbone de la campagne du projet CarSGuy, des campagnes RMQS Guyane et des données des inventaires pédologiques sauvegardées dans la base de données Valsol Guyane.

Les sols concernés par l'échantillonnage sont rattachés à un ensemble de références de Ferrallitisols, un ensemble de Podzolsols, un ensemble de Réductisols et de Thalassosols, des Fluvisols et Rédoxisols (Référentiel pédologique, 2008).

Inventaire des stocks de carbone mesurés dans le cadre du projet (CarSGuy)

Dans le cadre du projet 35 sites ont été inventoriés et prélevés (Annexe 1 ; Fig. 2). La méthodologie suivie est celle du RMQS (**Réseau de mesures de la qualité des sols de France, www.gissol.fr**), à savoir : constitution d'une fosse pédologique, observation du profil de sol, constitution d'échantillons moyens prélevés à la tarière sur une surface contiguë à la fosse sur une surface de rayon de 15 m (6 rayons à angle de 60°, 5 points de prélèvements par rayon, chaque échantillon moyen de couche est constitué de 30 échantillons prélevés puis mélangés) ; les couches 0-0,3, 0,3-0,5 m et 0,5-1 m sont constituées lorsque les conditions pédologiques le permettent. Dans la fosse pédologique des échantillons sont prélevés pour chaque horizon observé, ainsi que les densités apparentes, méthode au cylindre de 500 cm³ (Mathieu & Pielain, 1998 ; NF ISO 11272) si la charge en éléments grossiers est faible (<12-15 % volumique apprécié sur le terrain) ; lorsque la charge en éléments grossiers l'imposait la méthode volumétrique à l'eau a été systématiquement employée ; dérivée du principe de la méthode au sable (Mathieu & Pielain, 1998) et des adaptations des normes NF X 31-503 et NF ISO 11272 ; l'ensemble est bien résumé pour les praticiens dans le dernier manuel RMQS (www.gissol.fr). L'ensemble de cette campagne de terrain s'est organisée sur quatre mois, dans le courant de 2017, a été assuré par A. Courte (IE IRD cdd financement du projet) sous la responsabilité de M. Brossard avec l'appui d'un technicien IRD (J-C. Doudou) et des manœuvres en emplois temporaires.

Inventaire des stocks de carbone mesurés dans le cadre du Programme RMQS-Gis Sol « Guyane »

Deux campagnes de prélèvements constituant 33 sites RMQS (Fig. 2) se sont déroulées en 2014 et 2015. Co-produites par INRA-Infosol et IRD-Eco&Sols (C. Jolivet & M. Brossard) elles ont réuni un collectif de pédologues (D. Blavet, L. Boulonne, M. Brossard, T. Desjardins & C. Jolivet &) et d'IT (N. Soler, J-C.Doudou, B. Maître) des deux instituts et des manœuvres locaux.

Préparation des échantillons, mesure de la charge en éléments grossiers et analyse de la teneur en Carbone des campagnes RMQS et CarSGuy

Les échantillons séchés à l'air sont tamisés à 2 mm. La masse sèche (105°C) de refus minéraux à 2 mm est mesurée après lavage. Une aliquote de la terre fine est finement broyée (< 200 µm) pour analyse du carbone total (Ct) par combustion sèche (ThermoQuest NA 2100). La supervision de la préparation des échantillons des campagnes RMQS a été assurée par Nicolas Soler (Inra-Infosol) selon le cadre normatif du programme RMQS au sein du Laboratoire des Moyens Analytiques de l'IRD à Cayenne¹. Les échantillons CarSGuy ont subi le même protocole. L'ensemble du traitement et analyses a été effectué par Max Sarrazin et Eric Beaucher (LAMA IRD).

Calcul du stock de carbone de la terre fine

Le stock de carbone total de la terre fine est calculé selon l'équation suivante (équation 1) :

$$SC_{tf} = DA \times [Ct] \times E \times TF \quad \text{équation 1}$$

où DA est la densité apparente (**kg de sol m⁻³**) de la couche, [Ct] la concentration en carbone total de la terre fine (**kgC kg de terre fine⁻¹**) , E l'épaisseur de la couche (**m**) et TF la proportion de terre fine dans la couche de sol considérée (**kg terre fine kg de sol⁻¹**).

Le stock de carbone contenu dans les refus végétaux (C>2mm) n'a pas été déterminé, cela pourra être fait dans un second temps, les échantillons étant conservés. Les unités dans de l'équation 1 ont été adaptées pour exprimer les stocks de carbone total (SC_{tf}) en kgC m⁻² pour les pédons et MgC ha⁻¹, lors des spatialisations.

Pour l'inventaire CarSGuy, les mesures des stocks utilisent les concentrations en carbone des échantillons composites jusqu'à 1 m de profondeur ; s'agissant de l'inventaire RMQS, les données

¹ LAMA -Laboratoire des Moyens Analytiques US 191 IMAGO IRD (<http://www.imago.ird.fr/>), ISO 9001, et réseau WEPAL pour les sols

proviennent des échantillons composites pour la couche de sol 0-0,5 m et des couches 0,5-1 m des fosses pédologiques.

Valorisation des données de carbone des sols de la base de donnée IRD « Valsol_Guyane »

La base de données

Les données existantes sont issues des travaux réalisés par l'ORSTOM à partir des années 1950 et poursuivis par l'IRD ; les derniers travaux de relevés pédologiques remontent à 2007. La base de données regroupe 18 zones d'études qui comptabilisent 643 profils de sols pour le territoire, parmi ceux-ci, 249 ont été analysés comprenant 827 horizons de sols. Ce sont des études pédologiques au 1/50 000^e ou 1/100 000^e. L'ensemble de ces données a été informatisé dans le système de gestion de données relationnel VALSOL (Beaudou & Le Martret, 2004). La base de données comprend les informations relatives aux unités pédologiques cartographiées (Carte 1, T2), la description des profils de sols et les résultats d'analyses physico-chimiques des horizons de sols. La base de données géoréférencée a été constituée en 2001 (Leprun et al.) puis revue en 2015 dans le cadre des synthèses du GIS Sol (Dupuits et al., 2015). L'ensemble de cette information concerne une bande du nord du territoire sur sa façade maritime, qui représente 13 % de la surface du territoire de la Guyane mais comporte aussi des pédon inventoriés dans l'intérieur du territoire (Fig. 2).

Extraction des informations

Les données extraites de la base de données sont la typologie des sols, la teneur en argile, la teneur en fer total, la teneur en carbone total :

Tableau 1 - Statistiques descriptives des propriétés des sols (extraction Valsol - Guyane)

	MIN	Q1	MOY	MED	Q3	MAX	n
<i>Podzosols et « podzoliques »</i>							
Argile g.kg ⁻¹	5,0	20,0	68,4	30,0	68,8	650,0	80
C _{ot} g.kg ⁻¹	0,1	2,2	15,1	6,1	17,8	190,3	80
Fe ₂ O ₃ g.kg ⁻¹	0,0	0,2	1,5	0,6	1,3	11,2	49
<i>Ferrallitisols</i>							
Argile g.kg ⁻¹	15,0	150,0	294,4	270,0	413,4	800,5	359
C _{ot} g.kg ⁻¹	0,2	4,0	14,6	8,6	17,8	96,3	365
Fe ₂ O ₃ g.kg ⁻¹	0,9	4,1	33,4	7,0	16,4	377,4	221
<i>Réductisols & Rédoxisols</i>							
Argile g.kg ⁻¹	55,0	190,0	332,8	360,0	460,0	630,0	65
C _{ot} g.kg ⁻¹	0,1	3,4	16,6	9,0	24,4	69,7	65
Fe ₂ O ₃ g.kg ⁻¹	1,0	3,1	9,6	4,9	8,6	73,6	23
<i>Fluvisols, Réductisols, Thalassosols</i>							
Argile g.kg ⁻¹	5,0	405,0	411,7	490,0	560,0	610,0	59
C _{ot} g.kg ⁻¹	0,3	9,5	25,1	13,6	27,2	171,3	59
Fe ₂ O ₃ g.kg ⁻¹	2,0	3,0	29,3	5,0	43,1	115,7	19

Il convient de signaler que l'ensemble des analyses provient du même laboratoire, actuellement LAMA-US Imago-IRD à Cayenne. Les méthodes d'analyses sont les mêmes, en particulier pour le carbone par attaque sulfochromique (Walkey & Black, 1934) pour les déterminations antérieures à 1999 ; l'analyse granulométrique est faite par densimétrie après dispersion au pyrophosphate de sodium (méthode pipette Robinson) ; le fer total après attaque triacide.

Des amplitudes importantes sont observées, les teneurs en argile peuvent être nulles dans certains sols podzoliques, ou bien très élevées dans certains Ferrallitisols remaniés et rajeunis ; la variabilité de la teneur en fer total-triacide également. Sans faire un exposé de la pédogenèse locale, nous avons choisi de regrouper dans un grand ensemble de Ferrallitisols la diversité de situations guyanaises qui se caractérisent par un fonctionnement ferrallitique. Cette grande variabilité fait du plateau des Guyanes un cas original dans le monde tropical du bouclier Pré-Cambrien, où une homogénéité pourrait être attendue, mais en fait la diversité morphopédologique est très élevée et rejoint celle des milieux insulaires volcaniques lorsqu'elle est décrite aux échelles du 1/50 000^e.

Nous disposons de 665 horizons dont la concentration en carbone a été mesurée, ils sont répartis en 235 profils de sols. Après sélection de la cohérence des données disponibles, en particulier sur des erreurs de saisies, par vérification en particulier de la cohérence de la somme des fractions granulométriques, la recherche de données aberrantes a aussi été effectuée (pH, CEC).

Lors de ces études, période antérieure à 1999, les analyses de carbone ont été effectuées par oxydation par voie humide ; les sols de Guyane ne contenant pas de carbonates, les résultats expriment une teneur en carbone organique total (C_{ot}). Les déterminations par voie humide minorent le carbone total (De Vos et al., 2007). Nous avons corrigé cette valeur à partir des données d'une collection d'échantillons où le C_t est obtenu avec l'analyse par voie sèche (analyseur élémentaire) et le C_{ot} par voie humide sur un lot de Ferrallitisols :

$$C_{ot} = 0,962 C_t - 1,864 ; r^2 = 0,950 \quad n = 28 ; \quad \text{équation 3}$$

Cette équation de régression a été appliquée aux résultats C_{ot} après sélection de 569 horizons de la base de données, pour obtenir les teneurs de C_t .

La nature de la donnée Valsol et son utilisation pour l'estimation des stocks de C

La question méthodologique peut être posée : peut-on utiliser les données issues de calculs de stocks à l'échelle du pédon, donc métrique, pour les affecter à des échelles plus larges ?

La première réponse est liée à la nature des pédons : ce sont des données sélectionnées pour étayer la cartographie et la connaissance des sols, donc les sites sont des référents de typologies morpho-pédologiques lors des inventaires. Ils sont donc révélateurs de l'état et de la qualité du sol au moment de leur description/prélèvement. Ainsi dans une unité cartographique (UC), le référentiel à un pédon X par la dénomination révèle la généricité du choix du pédon X. S'agissant des stocks de carbone c'est cette approche traditionnelle qui a été utilisée depuis 35 ans et les premières publications de cartogrammes de stocks de carbone des sols. La littérature est abondante, inutile d'en faire ici l'exégèse.

La seconde approche directe consiste à comparer les données des mesures dans les pédons avec les estimations sur échantillons composites d'une couche de sol pour le même site. Pour ceci, les données du RMQS en Guyane sont parfaites ; nous ne pouvons pas étendre la population d'observation aux données de carbone des pédons prélevés dans CarSGuy, les analyses n'étant pas terminées. Donc si on compare le stock-profil au stock-couche pour la couche 0-0,3 m

$$\Delta = [SC_{0-30} - SC_{profil\ 0-30}] / SC_{0-30} \quad \text{équation 2}$$

l'écart (Δ) mesuré entre ces deux mesures est de : $\Delta_{médiane} = 12,9 \%$ et $\Delta_{moyenne} = 8,2 \%$ ($n = 27$ sites) par rapport à la mesure du stock-couche considéré comme la référence.

Ceci est très intéressant, il apparaît ainsi qu'en moyenne la mesure dans les fosses pédologiques sous-estime de 8,2 % le stock de la couche de sol 0-0,3 m soigneusement prélevée sur l'aire considérée. Cinq sites sont à fort écart entre la valeur mesurée dans la fosse et celle de la couche, ils sont de deux types : des sites de sols alluvionnaires avec horizons très organiques, voire tourbeux, hydromorphes, salés ou pas, et des sites sur des sols peu épais sur cuirasses ferrugineuses. Le test-t appliqué aux 27 couples de stocks donne une $p = 0,0022$.

Nous reviendrons sur ces faits lors de la présentation des résultats des stocks.

A ce stade de l'enquête, nous considérons l'écart entre les mesures à l'échelle des pédons et les mesures sur l'aire comme acceptables au vu de la complexité du milieu. L'utilisation de données issues de la base de données mérite d'être prise en considération.

La question de la détermination de densités apparentes de la BD « Valsol Guyane »

Les densités apparentes (DA) contenues dans la base de données (BD) Valsol ont bien entendu été utilisées. Mais cette BD étant peu pourvue en valeurs de DA, il nous faut donc rechercher une fonction de pédotransfert cohérente afin d'attribuer des DA à la collection de profils de sols qui en sont dépourvus. C'est la lancinante remise en question lors de l'exploration de données acquises par le passé. Dans le cas de la Guyane, il a fallu se rendre à l'évidence que pour diverses raisons, dont des conditions de travail et d'accès au terrain, très peu de pédons ont été renseignés avec la détermination de la densité apparente. Il a fallu attendre des programmes axés sur la physique du sol, la caractérisation de la porosité et le fonctionnement hydrique.

Diverses équations de pédotransfert pourraient servir, des équipes IRD s'étaient pliées au jeu par exemple à Madagascar (Grinand et al., 2009). Mais ces équations tiennent peu compte de caractères physiques des sols, tout au plus parfois de la teneur en argile, mais elles sont souvent redondantes car elles utilisent la teneur en carbone. Nous pourrions aussi rechercher une relation entre la DA et la lithologie. Cela a bien été observé sur les sols ferrugineux d'Afrique de l'Ouest (Leprun com. perso.). Mais en Guyane la connaissance de la lithologie n'est pas toujours précisément renseignée dans la base de données. Les profils d'altération étant très profonds, les faits géologiques sont difficiles à cerner à l'échelle de la description de certains pédons. Nonobstant, une autre démarche cohérente est ici proposée.

Nous partons des faits suivants : (a) Lévêque (1967) nous montre une très bonne relation positive entre la teneur en argiles granulométriques et la mesure de teneur en eau à pF_{4,2} (méthode sur plaques « Richards ») ; (b) Grimaldi et al (1994) montrent la relation inverse entre la teneur en argiles et la densité apparente de dix pédons et, la relation entre DA et teneur en fer total : nous avons ainsi confirmation que l'organisation microstructurale des argiles et ses liens avec le fer conditionnent l'expression de la porosité de ces sols, donc son expression la plus simple qu'est la DA. Ces faits sont maintenant bien admis en particulier pour les sols à horizons kaolinitiques (Balbino et al., 2002). En effet, la minéralogie des sols ferrallitiques de Guyane est caractérisée par une composition dominante de kaolinite, de goëthite et hématite, parfois de gibbsite (Lévêque, 1967 ; Robain, 1992 ; Tandy et al., 1990 ; Veillon, 1991).

Nous avons donc recherché les liens entre la DA et les variables argile et fer total d'une population d'horizons de l'inventaire RMQS. Nous nous sommes basés sur la masse volumique de terre fine mesurée (DA_{tf} en g.cm⁻³), donc après correction de la masse refus à 2 mm. L'observation des nuages de points des régressions simples $DA_{tf}=f(arg)$ et $DA_{tf}=f(Fe_t)$ nous conduit à proposer une régression linéaire multiple associant teneur en argile granulométrique et teneur en fer total à la DA de la terre fine. En faisant ainsi nous écartons le problème des éléments grossiers (> 2mm) et nous travaillons avec les valeurs de DA de la terre fine (DA_{tf}) directement corrigée utilisée pour le calcul du stock de carbone, l'échantillon de terre fine étant le même pour l'analyse granulométrique et les analyses de carbone et fer total. Les régressions simples linéaires obtenues avec la collection récente des sols de l'échantillon RMQS Guyane sont les suivantes :

$$DA_{tf} = -0,006 [arg] + 1,275 ; r^2 = 0,1071 \quad n = 106 \quad p = 0,0006 \quad \text{équation 4}$$

$$DA_{tf} = -0,0026 [Fe_t] + 1,252 ; r^2 = 0,2641 \quad n = 106 \quad p < 0,00001 \quad \text{équation 5}$$

l'équation multiple linéaire est la suivante :

$$DA_{tf} = -0,0041 [Fe_t] + 0,0066 [arg] + 1,1246 ; r^2 = 0,3029 \quad p < 0,0001 \quad n = 106 \quad \text{équation 6}$$

Lorsque les teneurs en argile et fer étaient renseignées dans la BD Valsol, l'équation multiple a été appliquée, dans le cas contraire l'une des deux équations linéaire simple l'a été.

La mesure des stocks repose également sur l'équation 1.

La spatialisation des stocks

Chaque stock de carbone est déterminé suivant deux références, l'horizon tel que définit sur le terrain et une épaisseur de couche standard. Plusieurs épaisseurs ont été choisies : 0-0,3 m, 0,3-0,5 m, 0,5-1 m, 0-1 m ; ainsi la spatialisation des stocks de carbone sera réalisable pour ces divers couches de sol. L'ensemble des profils échantillonnés est géolocalisé et centralisé dans une couche

qui regroupe pour chacun des sites ses valeurs de stock de carbone (0-0,3 ; 0-0,5 et 0-1 m), son type de sol et la campagne d'échantillonnages dont il est issu. Tout l'enjeu de la spatialisation est d'extrapoler des données issues de prélèvements ponctuels (sous forme de points) à des ensembles cohérents (sous forme de polygones).

Spatialisation en fonction de la carte pédologique (T2 Annexes & Cartes)

Les grands types de sols : La couche pédologique est organisée en « unités » de sols (homogénéisées pour un rendu au 1/50 000^e) qui représentent les types de sol présents sur le territoire et leurs aires de répartition sous forme de polygones. L'objectif est d'attribuer des valeurs de stocks moyens à ces unités à partir des données collectées dans les différentes campagnes CarSGuy, RMQS et ValSol. Ainsi, en Guyane, nous distinguons quatre grands types de sols selon la CPCS, sols Ferrallitiques, sols Hydromorphes, sols peu évolués d'apport alluvial et Podzols, eux même découpés en sous unités.

Nous avons utilisé, à partir des données disponibles la médiane de stock de carbone représentant chaque sous ordres de sol puis affecté ses valeurs à leur unité pédologique cartographique. Ainsi, nous distinguons, 44 unités cartographiques.

Dans certaines portions réduites du territoire, 974 km² à l'ouest de la zone cartographiée, la distribution des sols est très compliquée (mitage d'unités) et la synthèse cartographique ne permet pas de faire le distinguo en unités pures. Elles sont renseignées en associations de sols, composés de deux ou trois types de sols. Ces unités sont définies par des règles normées suivantes (Fig. 3), à dire d'expert lors des réalisations des cartes pédologiques deux types de sols impliquent que le type 1 occupe au moins les deux tiers de la superficie, pour trois types de sols le sol dominant doit occuper 60% de la superficie.

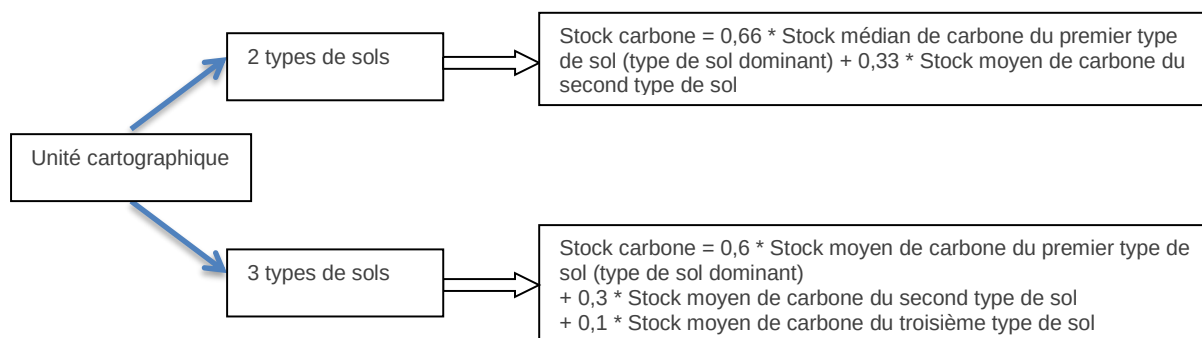


Figure 3 – Schéma représentant la règle de proportionnalité utilisée entre les unités cartographiques d'associations de sols et la typologie des sols

Spatialisation en fonction des paysages pédo-morphologiques (T2 Annexes & Cartes)

La seconde approche, basée sur la méthode (Fig. 4, page suivante) consiste à attribuer des valeurs de stocks aux 19 sous-unités pédo-morphologiques (tirées de 4 grands paysages pédo-morphologiques, Dupuis et al., 2015). Il est calculé les aires de répartition des différents sous-ordres de sols afin de pondérer la valeur de stock du Paysage. Les unités morfo-pédologiques sont présentées en Annexes 2 et 3 ; les Cartes 6, 7 et 8 du T2 présentent les spatialisations selon les couches de sols considérées.

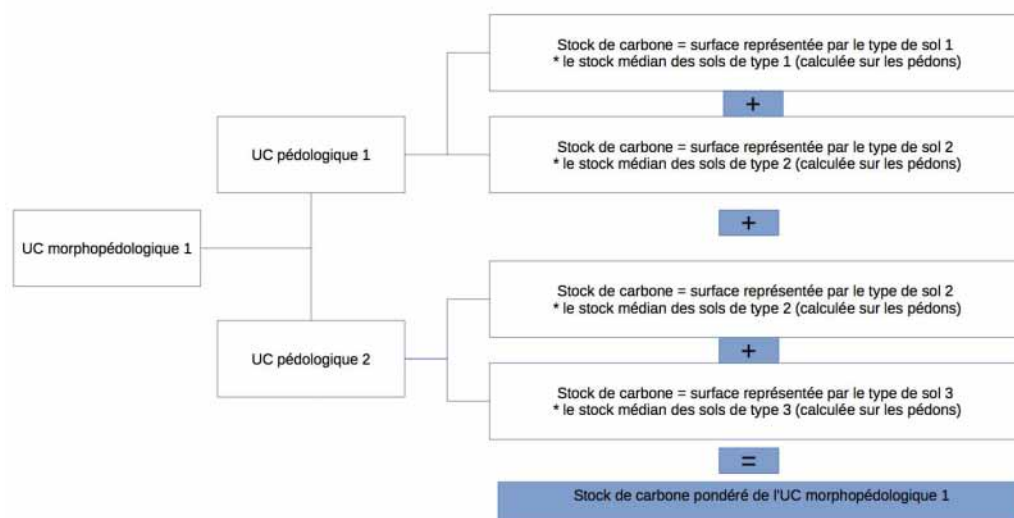


Figure 4 - Schéma représentant la règle de proportionnalité utilisée entre les unités cartographiques morpho-pédologiques et les unités de sols

Le tableau 2 présente un exemple d'une unité morpho-pédologique sur des formations alluvionnaires et fluviales de l'ouest du territoire.

Tableau 2 – Exemple du stock de carbone d'un grand paysage pédo-morphologique GP-1-4

Paysage	n° Grand Paysage	n° unité Paysage	SURF_Km ²	STOCK médian pondéré de référence MgC.ha ⁻¹			Stock total MgC 0-1m
				0-0,3 m	0-0,5 m	0-1 m	
Paysage alluvionnaire et fluvial de la Mana et ses affluents	GUY-GP1	GUY-GP1-P4	86,9311	129,22	178,38	266,11	23 133,23

Prédiction de stocks de carbone sur le moyen et le long terme

L'objectif est d'étudier la trajectoire des stocks de **carbone organique du sol (COS)** dans toute une série de sites prélevés, en utilisant le modèle RothC, dans le but de pouvoir extrapoler temporellement l'évolution des stocks de COS. L'originalité de l'approche dans le contexte amazonien est d'utiliser les données de restitutions organiques par les agrosystèmes comme données d'entrées du modèle. Les protocoles ont été mis en œuvre et réalisés par Kenji Fujisaki (IRD) à partir de la collection de mesures de stocks *in situ* du projet CarSGuy et du programme RMQS.

Démarche et méthode

Le modèle RothC 26.3 (Coleman & Jenkinson, 1999) est un modèle de décomposition et de renouvellement de la matière organique du sol basé sur des compartiments conceptuels qui respirent du carbone avec des cinétiques de décomposition du premier ordre. Le pas de temps considéré par le modèle est mensuel. RothC comprend 5 compartiments du carbone (qui forment l'ensemble du carbone du sol), dont 4 sont actifs (Fig. 5) : DPM, la fraction labile des apports organiques ; RPM, la fraction résistante des apports organiques ; BIOM, la biomasse microbienne et HUM, la matière organique humifiée. IOM est un compartiment inactif, constitué de matière organique d'origine géologique. Les apports organiques au sol sont divisés en DPM et RPM avec un ratio dépendant de l'écosystème considéré (1,44 pour les cultures et prairies fertilisées, 0,25 pour les forêts, 0,67 pour les savanes, prairies dégradées et jachères). Ces deux compartiments se décomposent en respirant du CO₂ et en formant du BIO et HUM, qui à leur tour respirent du CO₂ et forment du BIO et HUM. Le partitionnement du carbone respiré et transféré vers BIO et HUM est défini par la teneur en argile du sol.

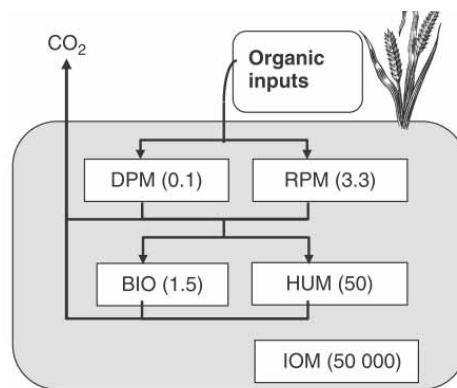


Figure 5 – Structure du modèle RothC. DPM = decomposable plant material, RPM = resistant plant material, BIO = biomasse microbienne, HUM = matière organique humifiée, IOM = matière organique inerte. Les chiffres entre parenthèses correspondent aux temps de résidence moyens des compartiments du carbone. Source : Shirato et al. (2013).

La quantité de carbone ΔY qui se décompose dans un compartiment pour un mois donné est calculée selon l'équation 7 :

$$\Delta Y = Y(1 - \exp^{-abck}) \text{ équation 7}$$

où Y est la taille du compartiment au début du mois, k le temps de résidence défini pour le compartiment, a le facteur de décomposition lié à la température, b le facteur de décomposition lié à l'humidité du sol, et c le facteur lié à la couverture ou non du sol.

a est calculé en fonction de la température de l'air pour le mois donné (Tableau 3). Le calcul de b est plus complexe, et fait appel au déficit d'humidité du sol ($TSMD$ pour topsoil moisture deficit), dont la valeur maximale exprimée en mm est définie par la teneur en argile du sol selon l'équation 8 :

$$Max.TSMD = -(20.0 + 1.3 (\%argile) - 0.01 ((\%argile)^2)) \text{ équation 8}$$

RothC calcule ensuite le $TSMD$ accumulé ($acc. TSMD$) dans le sol comme étant la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration durant les mois où l'évapotranspiration est supérieure aux précipitations. Dans RothC l'évaporation « open-pan » est multipliée par 0,75 pour obtenir l'évapotranspiration.

La décomposition de chaque compartiment actif produit du CO_2 et du carbone transféré vers les compartiments HUM et BIO . Le partitionnement entre le CO_2 et $HUM+BIO$ est déterminé par la teneur en argile du sol (g 100g-1 sol) :

$$CO_2/(HUM + BIO) = 1.67 \times (1.85 + 1.60 \exp^{-0.0786 \times argile}) \text{ équation 9}$$

Variables d'entrée du modèle

Les variables d'entrées sont regroupées dans le Tableau 3. Pour les variables climatiques la température moyenne mensuelle de l'air est requise, ainsi que les précipitations mensuelles moyennes et l'évaporation mensuelle moyenne. Nous avons utilisé les données climatiques fournies par Météo France.

Nous avons utilisé les données d'évapotranspiration (ETP). Les valeurs d'ETP ont été divisées par 0,75 afin d'estimer l'évaporation « open pan » utilisée dans RothC (Coleman & Jenkinson, 1999).

Tableau 3 - Données d'entrée et de sortie du modèle RothC. Les apports de carbone incluent les restitutions de litière aérienne et racinaire ainsi que la rhizodéposition. Le ratio DPM/RPM est défini par défaut selon le type d'écosystème étudié : il est de 0,25 pour les forêts (tropicales ou tempérées), 1,44 pour les cultures et les prairies fertilisées, et 0,67 pour les jachères ou prairies abandonnées (Coleman & Jenkinson, 1999).

Données d'entrée	Données de sortie mensuelles
Température moyenne mensuelle de l'air	Stock de C de chaque compartiment
Précipitations mensuelles moyennes	Respiration hétérotrophe
Evaporation « open-pan » mensuelle	
Profondeur de la couche de sol	
Teneur en argile du sol	
Apports mensuels de carbone	
Ratio DPM/RPM	
Couverture du sol (oui/non)	

Les simulations dans notre cas ont été effectuées sur la couche 0-0,3 cm. Les teneurs en argile du sol sont celles mesurées sur les échantillons composites (RMQS) et celles estimées sur le terrain pour CarSGuy (analyses granulométriques en cours).

La couverture ou non du sol a été déterminée dans les agrosystèmes pour chaque mois à partir des itinéraires techniques du projet fournis par Terres Inovia CETIOM à Pointe Combi, ainsi que les apports mensuels de carbone estimés à partir des restitutions aériennes mesurées (Fujisaki et al., 2017; Perrin et al., 2014).

Les simulations sont faites sur une période de 35 ans. Deux scénarios ont été testés selon la méthode de déforestation envisagée :

- Sim 1 : La déforestation est faite sans brûlis et broyage du sous-bois forestier, restituant au sol 11,2 tC ha⁻¹ de végétation forestière (Perrin et al., 2014). Une plante de couverture (mélange de riz, graminée et légumineuses) est ensuite implantée durant un an environ, puis est fauchée, avec une restitution intégrale de la biomasse aérienne. Le système de cultures annuelles est ensuite mis en place, avec deux cycles par an (maïs et soja), et une restitution intégrale des résidus de culture au sol ;
- Sim 2 : Le scénario 2 est identique au scénario 1 concernant la plante de couverture et les systèmes de cultures annuels, en revanche la déforestation est pratiquée avec brûlis, sans restitution de carbone au sol.

Le tableau suivant résume les entrées de carbone selon les deux scénarios de simulation.

Tableau 4 - Entrées de carbone utilisées pour simuler la dynamique des stocks de C du sol après déforestation et mise en culture. Les entrées souterraines de C ont été estimées à partir des entrées aériennes de C, à l'aide d'équations allométriques (Fujisaki, 2014).

	Scénario 1	Scénario 2
Biomasse forestière issue de la déforestation (Mg C ha ⁻¹)	11,2	0
C aérien et racinaire issu des plantes de couverture (Mg C ha ⁻¹)	8,7	8,7
Résidus de culture – maïs (Mg C ha ⁻¹ an ⁻¹)	3,4	3,4
C racinaire – maïs (Mg C ha ⁻¹ an ⁻¹)	0,9	0,9
Résidus de culture – soja (Mg C ha ⁻¹ an ⁻¹)	2,2	2,2
C racinaire – soja (Mg C ha ⁻¹ an ⁻¹)	0,6	0,6

Les sites sélectionnés

Ce sont les sites inventoriés et dont les stocks ont été rigoureusement mesurés pour la couche 0-0,3 m (n = 68) CarSGuy et RMQS.

Mesure du devenir du stock de carbone d'un site suite à la déforestation ménagée

L'objectif de cette tâche est d'étudier la dynamique du carbone organique du sol sur du court/moyen terme (8 ans après déforestation - fin 2016), sur le site expérimental de Terres Inovia à Combi, et de simuler les variations de stocks de carbone des sols sur le long terme.

Présentation du site expérimental étudié à Combi

Site d'étude : essai de comparaison de systèmes de culture

Un site expérimental dédié de 7 ha, (Fig. 6) a été mis en place en 2008 par Terres Inovia à Pointe Combi sur un Ferralsol à drainage vertical libre, sur une zone plane. La zone a été délimitée sur une forêt primaire du site expérimental de Combi (appartenant au CIRAD et exploité par Terres Inovia ex-CETIOM), à environ 10 km au sud de Sinnamary (5°17'55"N / 52°55'01"W).

Il permet :

- d'évaluer un itinéraire technique innovant pour la conversion des terres forestières : déboisement sans brûlis, suivi du devenir de la biomasse forestière incorporée au sol ;
- d'évaluer différents modes de gestion agricole : cultures annuelles implantées avec travail du sol ou en semis direct, choix des cultures et de leur succession, plantes de couverture, gestion des inter-cultures, dates de semis, essais de variétés, de doses de fertilisation, etc. (essais sur 5 ha).

Cet essai a été mené en vue d'évaluer les conséquences du changement d'usage des terres sans brûlis et la durabilité des systèmes agricoles étudiés sur l'évolution de la fertilité des sols, sur le bilan carbone global et sur les flux de polluants dans les eaux.

Les sols ont été échantillonnés sous forêt en 2008, puis le site a été déforesté sans brûlis avec restitution de biomasse forestière au sol afin d'installer un essai de comparaison de systèmes de cultures (essai à 4 blocs de répétition, parcelles de 20 m x 10 m) (Fig. 5). Les modalités évaluées entre 2008 et début 2015 sont :

- forêt primaire,
- prairie fauchée (P),
- rotation maïs/soja avec travail du sol (disque sur 15 cm) (SC),
- rotation maïs/soja en semis direct (couvert associé très peu productif) (SD).

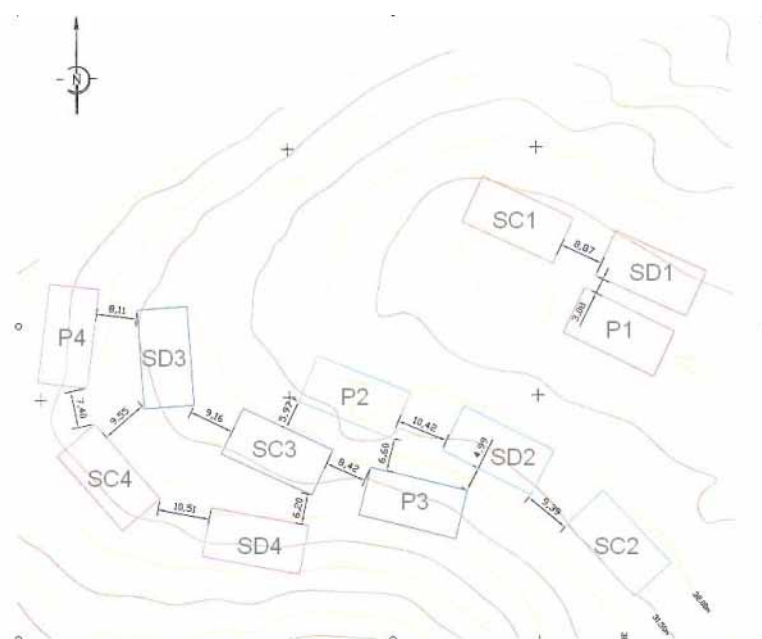


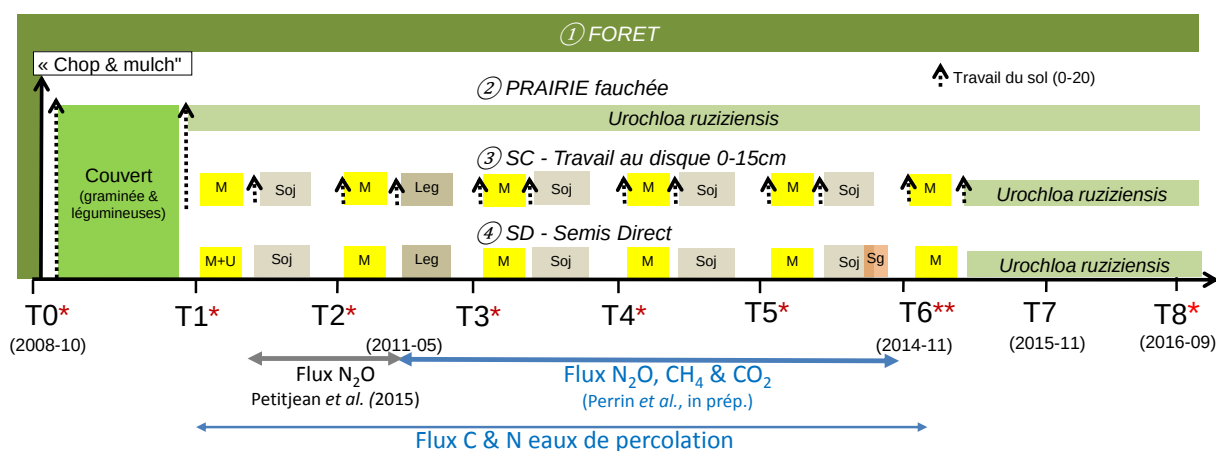
Figure 6 - Plan de l'essai de Pointe Combi avec les 4 blocs de répétitions (géolocalisés). Code des parcelles avant le 20 avril 2015, date d'implantation d'une prairie temporaire sur les parcelles SD & SC : maintenant P-ex-SD & P-ex-SC)

Entre 2008 et 2014, l'évaluation a porté sur (Fig. 7) :

- les rendements et la qualité des productions des cultures annuelles (maïs, soja) avec et sans travail du sol et les productions en biomasses de la prairie fauchée. Les rendements des cultures ont été stables durant cette période (maïs ~5t de grains secs ha⁻¹ & soja 2,5t GS ha⁻¹. La prairie de graminées a été très productive (~10t MS ha⁻¹ an⁻¹).
- la dynamique de la matière organique (MO ancienne et récente) dans les sols suite à l'apport des résidus de broyage de la biomasse forestière et des résidus agricoles. L'évolution des formes du carbone organique du sol (COS) a été suivie sur le moyen terme (5 années de culture) afin d'en estimer la stabilité selon les modalités (Perrin et al., 2014 ; Fujisaki, 2014 ; Fujisaki et al., 2017). Le modèle RothC qui calcule la vitesse de décomposition de la matière organique du sol en fonction des paramètres environnementaux et de gestion des sols a été paramétré pour les conditions tropicales humides (thèse K. Fujisaki, 2014). Ceci nous a permis de simuler l'évolution des stocks de carbone sur le long terme pour des parcelles sous cultures annuelles (avec et sans travail du sol) ou sous prairies fauchées (Section précédente).
- l'évolution de la fertilité physico-chimique des sols à moyen terme (bilans d'éléments sols/plantes) (données disponibles mais non publiées);
- les flux de N₂O, CH₄ et CO₂. Les flux annuels ont été quantifiés pendant 3,5 ans (4,5 ans pour le N₂O) pour chaque modalité. Ils ont été reliés à des paramètres auxiliaires (humidité volumique et température des sols, travail du sol, fertilisation, apport de biomasse, etc), en vue d'améliorer la compréhension des facteurs déterminants ces flux (Petitjean et al., 2015 ; Perrin et al., 2016). Le modèle NOE (Hénault et al. 2005) de simulation des flux de N₂O a ainsi pu être paramétré pour la Guyane (thèse C. Petitjean 2013) et a permis de simuler des flux annuels de N₂O. Le méthane et le dioxyde de carbone qui sont plus stables ne nécessitent pas de passer par la modélisation ;
- les flux annuels de carbone, d'azote et de résidus de produits phytosanitaires dans les eaux de percolation/lixiviation en lien avec les pratiques agricoles (26 lysimètres à mèches ont été installées en 2009 et 2010 sur le site, Fig. 6) (données disponibles mais non publiées).

L'évaluation agro-environnementale des modalités sous cultures annuelles a été poursuivie jusqu'à fin 2014. L'un des résultats majeurs durant cette période a été qu'après 5 années d'exploitation du site, le stock de carbone organique du sol (COS) avait diminué d'environ 15 % sous les deux systèmes de cultures annuelles (SD et SC) comparé au stock sous forêt. Durant la même période, le stock de COS s'était stabilisé sous le système prairial (P).

Aussi, après 6 années de cultures, une prairie d'*Urochloa ruziziensis* (i.e. *Brachiaria ruziziensis*) a été implantée le 20 avril 2015 sur les 8 parcelles du site précédemment sous cultures annuelles. Ceci avec l'objectif, dans le cadre de ce projet, d'évaluer l'effet sur les stocks de matières organiques de l'introduction d'une prairie temporaire dans une rotation de cultures annuelles. Les 4 parcelles sous prairie fauchée depuis fin 2008 font également l'objet du suivi (Fig. 5 et 6).



Mesure des variations de stocks de carbone et analyse de la dynamique du carbone à court terme

Interventions agricoles et quantifications de la biomasse aérienne produite

Les dates, les observations et la nature des interventions agricoles effectuées sur le site durant la période du projet ont été récoltées ainsi que les informations relatives aux mesures de production de biomasse de la prairie au sein des parcelles² (Tab. 5).

Les méthodes utilisées pour la réalisation des observations et le prélèvement d'échantillons de biomasse aérienne (idem Perrin et al., 2014 ; Fujisaki et al., 2017) sont :

- Pour les prélèvements : 2 fois 1 m² /parcelle, à l'aide du cadrat fourni, en dehors des zones de bordure des parcelles. Coupe à l'aide d'un sécateur à hauteur du plateau de tallage.
- Pour la mesure : pesée de chaque échantillon en vert, puis broyage. Prélèvement d'un sous-échantillon puis pesée de la masse fraîche et de la masse sèche après passage à l'étuve à 65°C pendant 48h, poids constant.

Un entretien des allées et abords a été effectué les 01 août 2015, 16 avril 2016 & 27 août 2016.

Tableau 5 - Calendrier des observations et interventions réalisées entre août 2015 et janvier 2016

Calendrier des observations et interventions*					DATE de réalisation effective
Date / stade de réalisation	Opérations à réaliser	Niveau	Référence méthode	Seuil de déclenchement	
Fin de saison sèche	Chaulage	parcelle	1t/ha de dolomie, épandue à la main		10 déc.2015
Fin de la saison des pluies	Quantification de la biomasse aérienne	parcelle	Voir ci-dessous	Début de dessiccation de la graminée	05 oct. 2015
	Echantillonnage biomasse et transfert au LAMA	parcelle			05 oct. 2015
	Analyses	parcelle	LAMA IRD CAYENNE		-
	Fauche pour foin	parcelle	Matériel de fenaison		20 oct. 2015
Fin de premier cycle saison des pluies	Quantification de la biomasse aérienne	parcelle	Voir ci-dessous	Avant fauche de régénération	-
	Echantillonnage biomasse aérienne	parcelle			-
	Analyses	parcelle	LAMA IRD CAYENNE		-
	Fauche de régénération – biomasse laissée sur place	parcelle	Effectuée au broyeur agricole	« petit été de mars »	Jugée inutile en 2016
Début de saison sèche	Fertilisation N,P,K	parcelle	40U de N, P ₂ O ₅ , K ₂ O (engrais 15/15/15)	Ralentissement des pluies	31 juil. 2016 (920g/ha urée + 250g 9/23/30)

² L'entretien du site et les mesures de biomasses aériennes et fenaison sont effectués par Jean-Claude Horth qui est agriculteur à Sinnamary et prestataire pour le projet (J.-C. Horth également conseiller agricole à la Chambre d'agriculture de Guyane depuis près de 20 ans, a travaillé en détachement au sein de Terres Inovia de 2008 à 2015).

Fin de saison sèche	Echantillonnage des sols 12 parcelles ex-SD, ex-SC, P (288 échantillons)	parcelle	c.f. Protocole Zxxsys973/Sols & Perrin <i>et al.</i> (2014)		19 au 21 sept. 2016
Fin de la saison des pluies	Quantification de la biomasse aérienne	parcelle	voir ci-dessous	Début de dessiccation de la graminée	7 nov. 2016
	Echantillonnage biomasse et transfert au LAMA	parcelle			7 nov. 2016
	Analyses	parcelle	LAMA IRD CAYENNE		-
	Fauche pour foin	parcelle	Matériel de fenaison		7 nov. 2016

Les biomasses exportées et restituées durant le projet sont présentées dans les tableaux 6, 7 et 8. Deux fenaisons ont été effectuées sur le site les 20 octobre 2015 et 7 novembre 2016. La biomasse aérienne a été préalablement mesurée sur les 12 parcelles du site expérimental. Aucune fauche de régénération n'a été effectuée car elle a été jugée inutile par l'agriculteur prestataire.

Tableau 6 - Quantités de biomasse fraîche et sèche exportées (g m⁻²) de tous les échantillons prélevés (durant ce projet) selon l'historique des parcelles

		Biomasse exportée			
		Fenaison du 20 octobre 2015		Fenaison du 7 novembre 2016	
		Matière fraîche	Matière sèche	Matière fraîche	Matière sèche
		g.m ⁻²			
Prairie ex-SD	Bloc n°				
	1 (1)	3733	2914	1190	1055
	1 (2)	2399	2034	797	728
	2 (1)	4512	3440	1598	1529
	2 (2)	3912	2633	1065	954
	3 (1)	3889	3274	1230	1156
	3 (2)	5112	4502	1303	1106
	4 (1)	2282	1011	798	743
Prairie ex-SC	4 (2)	3532	2282	898	853
	1 (1)	3230	2234	733	697
	1 (2)	2399	1657	1233	1068
	2 (1)	3428	2238	819	761
	2 (2)	3915	3314	745	698
	3 (1)	3548	1976	1066	1020
	3 (2)	3652	2130	1317	1180
	4 (1)	-	-	939	896
Prairie	4 (2)	2583	2202	947	883
	1 (1)	2264	1789	943	826
	1 (2)	1164	849	1333	949
	2 (1)	1428	830	1408	1067
	2 (2)	2627	1908	1249	1154
	3 (1)	1549	1056	1701	1522
	3 (2)	2250	1188	985	916
	4 (1)	2024	1322	1152	1085
	4 (2)	2973	2325	643	572

Tableau 7 - Moyennes et écart types des quantités de biomasse aérienne sèche (g m⁻²) exportées (durant ce projet) selon l'historique des parcelles

Dates	P ex-SD		P ex-SC		Prairie	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
20 octobre 2015	2761,2	1043,0	2250,0	512,5	1408,3	542,8
07 novembre 2016	1015,5	261,6	1011,3	275,3	900,3	178,1

Tableau 8 - Biomasses végétales exportées ou restituées au sol entre T0 et T8. Les moyennes sont suivies des écarts-types (les valeurs en gras correspondent aux biomasses après T5, non publiées).

Date	Type de restitution ou exportation	n	Matière sèche t ha ⁻¹	Teneur C g 100 g MS ⁻¹	Quantités C t ha ⁻¹
Oct 2008	Biomasse forestière broyée	14	24,1 ± 14,3	46,5 ± 2,5	11,2 ± 7,1
	Litière forestière		9,4 ± 5,2	49,2 ± 1,9	
Octobre 2009	Plantes de couverture	9	10,7 ± 3,4	45,5 ± 0,3	4,9 ± 1,6
Avril 2010	SD pailles maïs	4	2,0 ± 0,6	45,3 ± 0,4	0,9 ± 0,3
	SD récolte maïs	4	1,2 ± 0,6	43,9 ± 0,4	0,5 ± 0,3
	SD mulch	4	6,5 ± 2,0	44,2 ± 0,5	2,8 ± 1,1
	<i>Brachiaria ruzi.</i>	4	3,9 ± 0,6	45,6 ± 0,4	1,7 ± 0,3
	SC pailles maïs	4	3,9 ± 0,4	44,0 ± 0,4	1,7 ± 0,2
	SC récolte maïs	4	1,0 ± 0,7	43,3 ± 1,0	0,4 ± 0,3
	SC « salissement » ^a	8	n.m.	n.m.	n.m.
	P fauche		5,5 ± 2,1	44,7 ± 0,5	2,5 ± 1,0
	régénération				
	P fauche foin				
Août 2010	SD pailles soja	4	3,1 ± 0,1	46,2 ± 0,3	1,8 ± 0,2
	SD récolte soja	4	2,8 ± 0,4	53,3 ± 0,4	1,2 ± 0,2
	SC pailles soja	4	2,1 ± 0,2	44,3 ± 0,3	1,9 ± 0,1
	SC récolte soja	4	2,0 ± 0,1	53,0 ± 0,3	1,1 ± 0,1
	P fauche foin	8	11,0 ± 1,7	45,6 ± 0,2	5,0 ± 0,8
Avril 2011	SD pailles maïs	4	7,5 ± 0,9	45,6 ± 0,2	3,4 ± 0,4
	SD récolte maïs	4	5,1 ± 0,9	43,7 ± 0,8	2,2 ± 0,4
	SD mulch	4	0,9 ± 0,3	43,0 ± 0,7	0,4 ± 0,1
	<i>Brachiaria ruzi.</i>	4	7,9 ± 1,3	45,8 ± 0,3	3,6 ± 0,6
	SC pailles maïs	4	5,0 ± 1,0	43,9 ± 0,2	2,2 ± 0,4
	SC récolte maïs	8	2,2 ± 0,4	44,8 ± 0,3	1,0 ± 0,2
	P fauche	8	2,6 ± 0,3	44,9 ± 0,7	1,2 ± 0,1
	régénération				
	P fauche foin				
Août 2011 ^b	SD pailles	4	5,4 ± 1,2	45,6 ± 0,1	2,5 ± 0,5
	<i>Crotalaria</i> + <i>Stylo</i>	4	6,2 ± 0,2	45,6 ± 0,2	2,8 ± 0,1
	SC pailles	8	3,8 ± 0,5	45,9 ± 0,3	1,7 ± 0,2
	<i>Crotalaria</i> + <i>Stylo</i>				
	P fauche foin				
Avril 2012	SD pailles maïs	4	6,4 ± 0,5	46,4 ± 0,4	3,0 ± 0,2
	SD récolte maïs	4	4,3 ± 0,2	44,2 ± 0,1	1,9 ± 0,1
	SC pailles maïs	4	6,9 ± 0,5	46,5 ± 0,1	3,2 ± 0,2
	SC récolte maïs	4	5,0 ± 0,4	44,5 ± 0,2	2,2 ± 0,2
	P fauche	8	3,8 ± 0,6	45,6 ± 0,4	1,7 ± 0,3
	régénération				
Août 2012	SD pailles soja	4	5,4 ± 0,2	45,3 ± 0,3	2,5 ± 0,1
	SD récolte soja	4	3,3 ± 0,1	51,4 ± 0,1	1,7 ± 0,1
	SC pailles soja	4	5,0 ± 0,3	45,7 ± 0,2	2,3 ± 0,1
	SC récolte soja	4	3,2 ± 0,2	51,4 ± 0,3	1,6 ± 0,1
	P fauche foin	8	10,6 ± 0,6	45,3 ± 0,3	4,8 ± 0,3
Avril 2013	SD pailles maïs	4	8,4 ± 0,8	45,3 ± 0,4	3,8 ± 0,4
	SD récolte maïs	4	5,3 ± 0,4	44,3 ± 0,4	2,4 ± 0,2
	SC pailles maïs	4	7,9 ± 0,4	45,1 ± 0,2	3,6 ± 0,1
	SC récolte maïs	4	4,6 ± 0,3	44,5 ± 0,2	2,1 ± 0,1
	P fauche	8	4,8 ± 0,4	44,9 ± 0,3	2,2 ± 0,2
	régénération				
Août 2013	SD pailles soja	4	5,3 ± 0,1	45,5 ± 0,4	2,4 ± 0,0
	SD récolte soja	4	3,2 ± 0,2	50,9 ± 0,2	1,7 ± 0,2
	SC pailles soja	4	4,7 ± 0,6	45,7 ± 0,2	2,2 ± 0,3
	SC récolte soja	4	2,9 ± 0,2	51,3 ± 0,4	1,5 ± 0,1
	P fauche foin	8	13,6 ± 0,5	45,4 ± 0,4	6,2 ± 0,2
Mars 2014	SD pailles maïs	4	7,2 ± 0,9	Non mesuré	3,3 ± 0,2 ^c
	SD récolte maïs	4	4,3 ± 0,4	Non mesuré	1,9 ± 0,2 ^c
	SC pailles maïs	4	7,2 ± 0,3	Non mesuré	3,3 ± 0,4 ^c
	SC récolte maïs	4	4,3 ± 0,5	Non mesuré	1,9 ± 0,2 ^c
	P fauche	8	5,7 ± 0,8	Non mesuré	2,5 ± 0,4 ^c

régénération					
Août 2014	SD pailles soja	4	4,4 ± 0,2	Non mesuré	2,0 ± 0,1 ^c
	SD récolte soja	4	2,8 ± 0,3	Non mesuré	1,5 ± 0,2 ^c
	SD sorgho	4	1,7 ± 0,2	Non mesuré	0,8 ± 0,1 ^c
	restitué	4	4,1 ± 0,5	Non mesuré	1,9 ± 0,2 ^c
	SC pailles soja	4	2,7 ± 0,5	Non mesuré	1,4 ± 0,3 ^c
	SC récolte soja	8	11,4 ± 0,7	Non mesuré	5,1 ± 0,3 ^c
	P fauche foin P fauche foin				
Mars 2015	SD pailles maïs	4	8,1 ± 0,6	Non mesuré	3,7 ± 0,3 ^c
	SD récolte maïs	4	3,5 ± 0,5	Non mesuré	1,5 ± 0,2 ^c
	SC pailles maïs	4	8,5 ± 1,0	Non mesuré	3,9 ± 0,4 ^c
	SC récolte maïs	4	3,6 ± 0,8	Non mesuré	1,6 ± 0,4 ^c
Octobre 2015	P-ex-SD fauche foin	8	27,6 ± 9,4	Non mesuré	12,4 ± 4,2 ^c
		8	22,4 ± 3,7	Non mesuré	10,1 ± 1,7 ^c
	P-ex-SC fauche foin	8	14,1 ± 3,0	Non mesuré	6,3 ± 1,3 ^c
	Prairie fauche foin				
Novembre 2016	P-ex-SD fauche foin	8	10,2 ± 2,1	Non mesuré	4,6 ± 0,9 ^c
		8	9,0 ± 1,5	Non mesuré	4,0 ± 0,7 ^c
	P-ex-SC fauche foin	8	10,1 ± 1,8	Non mesuré	4,6 ± 0,8 ^c
	Prairie fauche foin				

^a Repousses de *Brachiaria ruziziensis*. ^b En raison d'un problème d'approvisionnement des semences de soja, la culture du soja de 2011 des systèmes SD et SC a été remplacée par un mélange de *Crotalaria juncea* et de *Stylosanthes Campo Grande* (légumineuses). ^c Estimations en utilisant la moyenne des teneurs en C% des années précédentes

Quantification des stocks de carbone organique des sols à T8 ans

Echantillonnage et traitement des échantillons de terre

Dans la continuité des mesures régulières effectuées sur ce site depuis 2008, un échantillonnage des sols de l'essai de Combi a été mené en septembre 2016, soit 8 ans après déforestation sans brûlis (Fig. 6). Cet échantillonnage a été effectué les 19, 20 & 21 septembre 2016 par Anne-Sophie Perrin et 4 manœuvres en emploi temporaire de Sinnamary qui avaient été formés à ces prélèvements les années antérieures.

Les sols des 12 parcelles ont été échantillonnés en 6 points par parcelle, sur les profondeurs 0-5, 5-10, 10-20 & 20-30 cm, à l'aide du kit d'échantillonnage de sol par cylindre calibrés 251 cm³ (diamètre 8 cm et hauteur 5 cm) (modèle Eijkelkamp). Cette méthodologie, utilisée lors des échantillonnages précédents, a été étalonnée avec des mesures classiques au cylindre (enfouissement manuel) en fosse pédologique (Fujisaki, 2014).

Les 288 échantillons de terre extraits en T8 ont été transportés au LAMA-IRD à Cayenne, pour leur traitement et leur analyse. Afin de réduire l'encombrement du laboratoire, nous avons décidé de diminuer le volume de terre à faire sécher. Durant les jours suivant les prélèvements, nous avons donc pesé les échantillons frais de terre et mesuré l'humidité des échantillons sur des aliquotes de terre afin de pouvoir déterminer la densité apparente des sols. Un sous-volume d'échantillon représentatif a ensuite été mis à sécher à l'air libre (sous climatisation) avant le tamisage à 2 mm. Les teneurs en carbone de la terre fine ont été déterminées par combustion sèche (analyseur élémentaire ThermoQuest NA2100, NF ISO 10694 & NF ISO 13878) par le LAMA comme lors des dates précédentes (méthodologie décrite dans Perrin et al., 2014).

Prédiction des stocks de C du sol par SPIR de terrain, sur carottes prélevées à la tarière à main (StockSpir)

Une mission en Guyane de deux semaines fin septembre 2016 a permis d'acquérir sur le terrain des spectres visible et proche infrarouge (VNIR) sur des sites où la masse volumique et donc le stock de carbone du sol étaient en cours de détermination, dans le cadre de ce même projet. Les sites de la campagne CarSGuy sur lesquels le stock de carbone du sol a été déterminé et le spectre VNIR acquis sont au nombre de 24. Des spectres ont été acquis sur d'autres sites, où le stock n'a finalement pas été mesuré. La mission a été réalisée par une équipe IRD, Bernard Barthès, Aurélie Cambou, Amandine Courte, Ernest Kouakoua, et Patricia Moulin.

Détermination de la masse volumique et données de Carbone Total (Ct)

Nous avons utilisé les données de masse volumique obtenues par d'autres partenaires du projet. Ces données permettent de calculer le stock de carbone par échantillon (produit de la concentration en carbone par la masse volumique). Mais nous avons préféré calculer les stocks avec des données de concentration en carbone mesurées sur les échantillons utilisés pour la spectroscopie (cf. ci-dessous), faisant l'hypothèse qu'il serait alors plus aisé d'ajuster les spectres sur les stocks (Cambou et al., 2016).

Echantillons pour la spectroscopie et la détermination de la concentration en carbone

Les spectres visible et proche infrarouge (VNIR) ont été acquis sur le terrain, sur carottes prélevées à la tarière à main (donc sur sol à structure remaniée) autour de la fosse où le stock de carbone avait été ou allait être déterminé sur chaque site. Quatre sondages à la tarière ont généralement été réalisés autour de la fosse rebouchée ou à ouvrir, à une distance de l'ordre de 1 à 2 m de cette fosse. Les spectres ont été acquis à des profondeurs de l'ordre de 3 cm et 7 cm pour la couche de sol 0-10 cm, 13 et 17 cm pour la couche de sol 10-20 cm, 23 et 27 cm pour la couche de sol 20-30 cm, 33 et 37 cm pour la couche de sol 30-40 cm, 43-et 47 cm pour la couche de sol 40-50 cm, et 53 et 57 cm pour la couche de sol 50-60 cm ; les huit spectres acquis pour une couche de sol de 10 cm d'épaisseur d'un site donné (quatre carottes avec deux profondeurs par carotte) ont ensuite été moyennés. Six couches de sol ont donc étudiées sur les 24 sites, sauf sur le site Régina25, où il n'a pas été possible d'enfoncer la tarière en-deçà de 40 cm de profondeur. Un total de $23 \times 6 + 4 = 142$ échantillons a donc été étudié.

La réflectance a été mesurée de 350 à 2500 nm à un pas de 1 nm (soit 2151 points) avec un spectrophotomètre portable ASD LabSpec 2500 (Analytical Spectral Devices, Boulder, CO, USA). Cet appareil utilise une lampe halogène comme source lumineuse, est équipé d'une grille de diffraction fixe et d'un détecteur à barrettes de diodes, et d'une sonde de contact placée manuellement sur l'échantillon pour l'acquisition du spectre (la surface scannée est de 80 mm²). La sonde était placée sur la carotte de sol telle que sortie du trou de tarière, sans lissage. Chaque spectre était la moyenne de 32 spectres élémentaires. Un test de recalibration a été réalisé environ toutes les heures avec un disque de Spectralon (polytétrafluoroéthylène), matériau standard parfaitement blanc et réfléchissant. La réflectance a ensuite été convertie en absorbance ($= 1/\log_{10}[\text{réflectance}]$).

Les quatre échantillons de chaque couche de sol de 10 cm d'épaisseur prélevés à la tarière sur chaque site ont été réunis pour former un composite, dont une aliquote a été séchée à l'air, ramenée à Montpellier, concassée puis tamisée à 2 mm, et enfin broyée à 0,2 mm, avant dosage du carbone par combustion sèche (analyseur CHN Fisons/Carlo Erba NA 2000, Milan, Italie). Ces concentrations ont été combinées aux densités apparentes mesurées sur fosse pour calculer **le stock de chaque couche de sol de 10 cm d'épaisseur** ; déterminées là où avaient été acquis les spectres, ces valeurs de stock de carbone étaient supposées permettre un meilleur ajustement des spectres que les stocks mesurés avec les concentrations en carbone déterminées sur fosses (Cambou et al., 2016).

Analyse des données spectrales

Les données spectrales ont été analysées avec le logiciel WinISI4 (Infrasoft International, LCC, State College, PA, USA). Afin de faciliter l'analyse, **des prétraitements mathématiques usuels ont**

été appliqués aux spectres pour les contraster, réduire les tendances linéaires ou curvilinéaires de chaque spectre ainsi que les effets additifs ou multiplicatifs, l'éventuelle variation de leur ligne de base ou l'effet de la taille des particules, etc. (Martens et al., 1983 ; Geladi et al., 1985 ; Barnes et al., 1989 ; Reeves et al., 2002) : dérivée première calculée sur 5 points (notée 15) ou 20 points (notée 120) de part et d'autre du point considéré, avec lissage sur 5 points de part et d'autre, ou absence de dérivation (notée 01), combinée éventuellement à un centrage-réduction (noté SNV pour standard normal variate) et à un abattement sur la ligne de base (noté D pour detrend, pouvant être combiné à SNV), ou sans autre transformation (noté None). Douze prétraitements ont donc été testés : None001, None155, None1205, SNV001, SNV155, SNV1205, D001, D155, D1205, SNVD001, SNVD155 et SNVD1205. De manière générale, un modèle de prédiction est construit sur une population d'étalonnage, ou calibration, et testé sur une population de validation. Nous décrirons plus bas comment les 142 échantillons étudiés ont été partitionnés en populations d'étalonnage et de validation.

Pour comparer les spectres ou des groupes de spectres entre eux, on a d'abord réalisé des **analyses en composantes principales** (ACP). L'ACP consiste à condenser l'information redondante portée par l'absorbance aux 2151 longueurs d'ondes en un petit nombre de composantes principales orthogonales (donc sans redondance), qui sont des combinaisons linéaires d'absorbances aux différentes longueurs d'ondes, construites de manière à maximiser la variance totale. Le plus souvent, 10 à 20 composantes principales suffisent pour représenter près de 100% de la variabilité des absorbances initiales. Des ACP ont été réalisées sur la population totale de spectres, par exemple pour apprécier son homogénéité, identifier des échantillons proches ou éloignés du centre de la population. Des ACP ont également été réalisées sur la population d'étalonnage, afin d'y projeter les échantillons de validation pour évaluer comment ils étaient représentés par la population d'étalonnage. Cette représentativité peut être appréciée visuellement, mais également au moyen de la distance de Mahalanobis H, sorte de distance euclidienne pondérée par les pourcentages de variance portés par les composantes principales, et normalisée ; $H > 3$ est souvent considéré comme un seuil d'éloignement important, d'un échantillon par rapport un groupe (centre de gravité) ou d'un groupe par rapport à un autre groupe (Mark & Tunnell, 1985).

L'**ajustement ou étalonnage des spectres sur la variable de référence** consiste à exprimer cette dernière, ici le stock de carbone de l'échantillon (en gC dm^{-3}), en fonction du spectre, et plus précisément, comme combinaison linéaire de l'absorbance à chaque longueur d'ondes i :

$$\text{Stock C} = a_0 + \sum_{i=1}^{2151} a_i \text{Abs}\lambda_i \quad \text{équation 10}$$

L'étalonnage revient donc à déterminer les 2151 coefficients de régression a_i ainsi que le terme constant a_0 , ce qui serait compliqué à réaliser directement car cela reviendrait à résoudre un système comptant autant d'équations que d'échantillons d'étalonnage et 2152 inconnues. De plus, l'information contenue dans les spectres est très redondante, c'est-à-dire que les absorbances à des longueurs d'ondes voisines sont étroitement corrélées entre elles. On condense donc l'information portée par les absorbances aux 2151 longueurs d'ondes en un petit nombre de variables latentes orthogonales (non corrélées entre elles), qui sont des combinaisons linéaires d'absorbances, comme dans une ACP. Mais, alors que dans l'ACP, les variables latentes (nommées composantes principales) sont construites avec l'objectif de maximiser leur variance (pour représenter au mieux la variabilité totale), dans la régression des moindres carrés partiels (PLS, pour partial least squares) considérée ici, les variables latentes sont construites avec l'objectif de maximiser leur covariance avec la variable de référence à prédire (stock de carbone). La **régression PLS** est l'approche de régression multivariée la plus utilisée actuellement en spectroscopie infrarouge quantitative (Stenberg et al., 2010). Le nombre de variables latentes utilisé est généralement de l'ordre de 5 à 20. Le nombre optimal de variables latentes à utiliser est déterminé par validation croisée : la population d'étalonnage est divisée par exemple en cinq groupes d'échantillons dont quatre utilisés pour développer le modèle et le cinquième pour le valider, à tour de rôle, l'opération étant donc réalisée cinq fois. Les résidus des cinq groupes sont cumulés pour calculer l'erreur standard de validation croisée (SECV) ; le nombre de variables latentes retenu pour le modèle est celui au-delà duquel SECV ne diminue plus sensiblement, ou dans le meilleur des cas, est minimum. Ce nombre de variables latentes est alors utilisé pour ajuster les 5 à 20 variables latentes sur le stock de carbone au sein de la population d'étalonnage, ce qui revient à résoudre un système comptant autant d'équations que d'échantillons d'étalonnage et autant d'inconnues que de variables latentes, système qui peut être résolu sans trop de difficulté. Les inconnues sont les coefficients de

régression permettant d'exprimer le stock de carbone comme combinaison linéaire des variables latentes. Une fois ces coefficients de régression déterminés, les variables latentes sont exprimées comme combinaisons linéaires des absorbances initiales ayant servi à les construire, pour déterminer les coefficients de régression permettant cette fois d'exprimer le stock de carbone en fonction des absorbances initiales, c'est-à-dire du spectre. Ces coefficients de régression, ainsi que le coefficient constant, constituent le modèle de prédiction, exprimant le stock de carbone en fonction du spectre. Ce modèle est ensuite testé sur la population de validation. Les paramètres utilisés pour évaluer la précision du modèle sont :

- le coefficient de détermination R^2 entre stock prédit et stock observé, qu'on souhaite le plus élevé possible ;
- l'erreur standard $SE = ((\sum_{i=1}^n (stock\ prédit\ éch\ i - stock\ mesuré\ éch\ i)^2)/n)^{0.5}$ où n est le nombre d'échantillons, exprimée en valeur absolue ou en proportion de la moyenne, et qu'on souhaite minimale ;
- le ratio RPD entre écart type et SE, qui compare donc l'erreur de prédiction à la variabilité, et qu'on souhaite maximal (erreur faible malgré une forte variabilité), et si possible supérieur à 2, ou au moins 1.6 ; en matière de prédiction des propriétés des sols, on considère souvent qu'un modèle est précis quand $RPD \geq 2$, et acceptable quand $RPD \geq 1.6$ (Chang et al., 2001 ; Dunn et al., 2002).

Ces trois paramètres peuvent être déterminés pour l'étalonnage ou calibration (R^2_{cal} , SEC, RPD_{cal}), la validation croisée (R^2_{cv} , SECV, RPD_{cv}) ou la validation/prédiction (R^2_{val} , SEP, RPD_{val}) ; ils seront surtout considérés ici en validation croisée et validation externe.

Constitution de la population d'étalonnage et de la population de validation

La population totale étudiée ici est constituée d'échantillons provenant de profils, et dans un souci de robustesse (capacité d'un modèle à prédire sur des échantillons différents de ceux utilisés pour l'étalonnage), il a semblé pertinent *a priori* que tous les échantillons d'un même profil soient utilisés soit pour l'étalonnage, soit pour la validation, mais ne soient pas partagés entre les deux (car dans ce cas, certaines profondeurs du profil étant utilisées en étalonnage, pour prédire en validation d'autres profondeurs du même profil, sans doute voisines à de nombreux égards, il y a le risque de construire un modèle ne sachant prédire que sur des échantillons voisins des échantillons d'étalonnage). Nous avons également eu le souci que la population d'étalonnage représente correctement la population de validation ; car appliquer un modèle de prédiction à des échantillons très différents des étalons a peu de sens.

Dans une première partition, notée Cal1Val1, on a divisé la population totale afin que les profils de validation soient bien représentés pédologiquement par les profils d'étalonnage. On a ainsi choisi pour la validation six profils dont des profils pédologiquement voisins, même éloignés géographiquement, pouvaient être utilisés pour l'étalonnage : 19, 41, 16, 17, 38 et 20 ; soit 36 échantillons, les 106 échantillons restant étant assignés à l'étalonnage.

Dans une deuxième partition, notée Cal2Val2, on a retiré de la population de validation le profil Régina41, mal représenté spectralement par la population d'étalonnage ($H > 3$ pour cinq des six échantillons du profil), soit 30 échantillons pour la validation et 112 étalons.

Dans une troisième partition, notée Cal3Val3, on a choisi pour la validation sept profils dont le spectre moyen (sur les six échantillons du profil) était proche du centre de la population d'échantillons, selon l'ACP réalisée sur la population totale (H minimal) : 25, 6, 28, 38, 39, 40 et 24, soit 40 échantillons (quatre échantillons seulement pour le profil de 25), les 102 échantillons restant étant utilisés pour l'étalonnage.

Dans un quatrième temps, pour la procédure notée Cal4Val4, on a prédit les échantillons de chaque profil à partir des échantillons de tous les autres profils (validation croisée "leave-one-profile-out"). A la différence des procédures précédentes, celle-ci permet de faire des prédictions sur tous les échantillons, puisqu'aucun n'est réservé spécifiquement pour l'étalonnage (tous les échantillons servant à l'étalonnage et à la validation, alternativement).

3. Résultats

Inventaire des stocks de carbone

Les données de densité apparente et de concentration en carbone des sols

Les estimations de da par fonction de pédotransfert montrent une distribution normale allant de 0,5 à 1,6 g cm⁻³ pour la terre fine (Fig. 8a). Les valeurs mesurées ont également une distribution normale (Fig. 8b). Les valeurs inférieures à 0,8 correspondent à des horizons de Fluviosols, Thalassossols, Réductisols sur alluvions ; les horizons de surface des sols forestiers présentent en général des valeurs allant de 0,7 à 1,1 g cm⁻³. Pour les valeurs supérieures à 1,3 g cm⁻³ deux cas de figures sont à considérer dans l'ensemble des Ferrallitisols : d'une part des horizons à faible porosité, argileux à très argileux caractérisant les sols à drainage vertical bloqué, et d'autre part des horizons à forte charge en fer total y compris dans la terre fine.

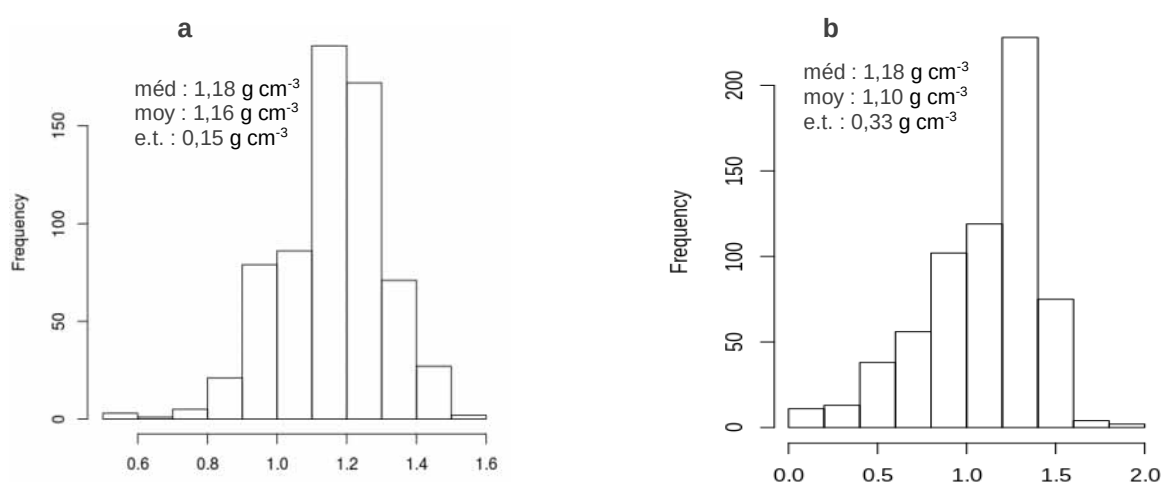


Figure 8 - Histogramme de distribution des valeurs de densité apparente de la terre fine (g.cm⁻³) : (a) valeurs estimées de da issues de la base de données Valsol_Guy (n=658) ; (b) valeurs des mesures des inventaires CarSGuy et RMQS (n=648).

La distribution des valeurs de concentration de carbone présente un net déséquilibre dans les deux populations (Fig. 9). Les médianes sont nettement inférieures aux moyennes. Ces histogrammes s'expliquent par le nombre important d'horizons mesurés jusqu'à la profondeur du mètre ayant des teneurs de carbone souvent inférieures à 0,1 %. De plus, les Réductisols, les Rédoxisols, les Fluviosols jeunes, les Thalassossols présentent parfois des horizons tourbeux voire des niveaux de tourbes, horizons qui apparaissent ici dans les teneurs de carbone les plus élevées (Fig. 9c). Parmi les Ferrallitisols, les teneurs de carbone de l'horizon de surface peuvent aller jusqu'à 5 % TS (terre sèche < 2mm, 105°C).

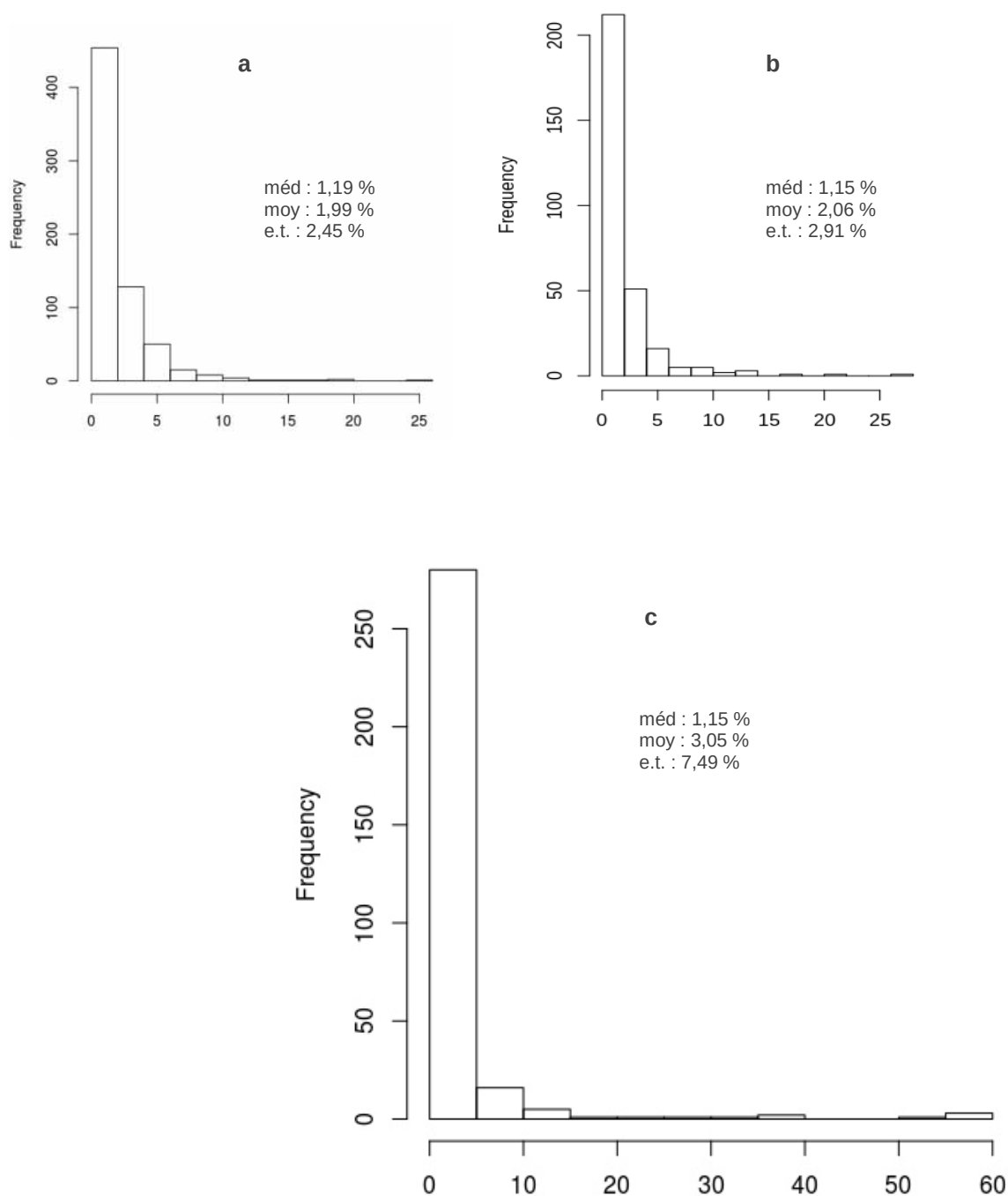


Figure 9 - Histogrammes de distribution des valeurs de concentration de carbone des sols (g/100g TS) : (a) valeurs calculées issues de la base de données Valsol_Guy (n=665) ; (b) valeurs des mesures réalisées lors les inventaires CarSGuy et RMQS (n=298) (valeurs > 30 non prises en compte) ; toutes valeurs des inventaires CarSGuy et RMQS (n=311).

Les stocks de carbone total des sols

Les mesures des stocks des sites CarSGuy

Avant d'agréger toutes les données, nous distinguons la campagne d'inventaire CarSGuy financée par le projet. En moyenne la couche 0-1 m contient 131,19 MgC ha⁻¹ (médiane = 111,34 MgC ha⁻¹),

l'amplitude est importante de 25 à 375 MgC ha⁻¹ (Tab. 9) Il s'agit d'une amplitude expliquée par la diversité pédologique des sites : les Ferrallitisols, qui comprennent ceux ayant un caractère rédoxique, sont le groupe présentant les stocks les plus importants, suivis des Réductisols ; les Podzosols (nous avons ici regroupé les « podzols et sols podzoliques ») constituent ici le groupe présentant les stocks les moins élevés. Nous pensons que dans notre inventaire nous n'avons pas eu les Podzosols les plus représentatifs de la Guyane, nous y reviendrons. Les Réductisols, Fluvisols (toujours réductiques ou rédoxiques) et Rédoxisols présentent des caractéristiques particulières avec de possibles horizons à fortes teneurs de carbone. Il convient d'ores et déjà de souligner l'importance de la couche 0-0,5m, qui contient 66 % du stock 0-1 m.

Tableau 9 - Données statistiques générales des Stocks de carbone des sols (MgC ha⁻¹) de l'inventaire (n=37 sites) CarSGuy, couches 0 à 1 m.

	MIN	Q1	MOY	MED	Q3	MAX	n
Tous types de sols							
Σ0-1	25,33	81,24	131,19	111,34	177,02	375,92	37
0-0,3	12,27	33,87	60,02	50,98	76,89	194,56	37
0,3-0,5	4,36	14,15	26,14	20,57	38,44	75,20	37
0-0,5	17,53	48,95	86,16	71,32	106,38	269,76	37
0,5-1	5,61	32,40	49,00	40,97	60,32	143,15	34
Ferrallitisols							
Σ0-1	64,92	120,03	161,85	159,70	212,22	249,52	18
0-0,3	32,69	51,98	71,28	71,98	87,02	116,92	18
0,3-0,5	13,10	22,02	33,84	31,98	40,95	62,57	18
0-0,5	45,79	75,28	105,12	102,24	136,76	171,40	18
0,5-1	19,13	34,20	56,73	52,75	63,48	143,15	17
Réductisols							
Σ0-1	61,87	74,80	106,97	100,37	108,37	220,22	7
0-0,3	32,34	39,31	54,22	48,40	61,22	97,75	7
0,3-0,5	8,09	13,13	20,60	16,24	22,49	48,60	7
0-0,5	48,74	55,48	74,82	61,87	77,90	146,35	7
0,5-1	23,55	28,82	45,01	45,56	53,29	73,86	5
Fluvisols & Rédoxisols							
Σ0-1	43,95	81,06	128,48	96,48	110,45	375,92	7
0-0,3	27,97	31,14	61,64	43,15	51,75	194,56	7
0,3-0,5	14,00	15,06	25,87	16,95	22,40	75,20	7
0-0,5	42,41	45,99	87,50	60,10	74,14	269,76	7
0,5-1	33,21	34,74	47,80	37,40	38,45	106,17	6
Podzosols							
Σ0-1	25,33	28,33	58,48	57,82	74,35	106,57	5
0-0,3	12,27	17,98	25,33	27,26	29,79	39,35	5
0,3-0,5	4,36	4,74	6,54	5,26	8,74	9,61	5
0-0,5	17,53	22,73	31,87	31,62	38,53	48,95	5
0,5-1	5,61	7,80	26,61	26,20	35,82	57,62	5

Le tableau 10 suivant présente les stocks inventoriés au cours de la campagne RMQS. Les stocks sont calculés d'après les échantillons composites jusqu'à 0,5 m de profondeur, et à partir des données collectées dans les fosses pédologiques pour la couche de sol 0,5-1 m de profondeur. Il convient de souligner la cohérence des résultats entre les deux campagnes d'inventaires.

Tableau 10 - Données statistiques générales des Stocks de carbone des sols (MgC ha⁻¹) de l'inventaire (n=32 sites) RMQS, couches 0 à 1 m.

	MIN	Q1	MOY	MED	Q3	MAX	n
Tous types de sols							
Σ0-1	24,12	87,05	124,84	108,45	132,38	439,69	32
0-0,3	15,86	43,88	65,84	60,24	70,37	288,58	32
0,3-0,5	4,37	16,10	25,34	20,01	24,04	151,11	32

0-0,5	24,12	63,64	91,18	84,74	94,71	439,69	32
0,5-1	0,67	18,27	39,89	24,62	36,03	388,50	27
Ferrallitisols							
Σ0-1	72,75	99,01	116,60	111,27	135,41	182,75	19
0-0,3	37,48	53,40	64,59	64,24	70,25	133,22	19
0,3-0,5	9,13	17,59	24,68	20,85	27,81	49,53	19
0-0,5	51,95	73,86	89,28	87,07	95,73	182,75	19
0,5-1	11,72	22,31	28,84	25,92	34,40	52,66	18
Réductisols							
Σ0-1	70,72	86,94	140,55	110,79	122,27	439,69	9
0-0,3	40,57	56,58	88,16	61,28	81,40	288,58	9
0,3-0,5	12,77	16,20	34,02	19,38	23,73	151,11	9
0-0,5	63,56	70,72	122,18	85,01	105,14	439,69	9
0,5-1	17,13	19,33	27,55	22,70	33,75	47,12	9
Fluvisols & Rédoxisols							
Σ0-1	24,12		160,34	38,72		418,18	3
0-0,3	15,86		19,24	16,57		25,28	3
0,3-0,5	7,55		10,41	9,85		13,82	3
0-0,5	24,12		29,65	29,68		35,13	3
0,5-1	3,59					388,50	2
Podzosol							
Σ0-1	33,45					33,45	1
0-0,3	28,42					28,42	1
0,3-0,5	4,37					4,37	1
0-0,5	32,78					32,78	1
0,5-1	0,67					0,67	1

Agrégation des mesures CarSGuy et RMQS

Nous avons regroupé les données des deux inventaires, compte tenu qu'il s'agit de la même méthodologie de prélèvement et d'analyse. En moyenne les stocks pour la couche 0-1 m sont de 128 MgC ha⁻¹ (Tab. 11). La répartition selon les couches 0-0,3 m, 0,3-0,5 m et 0,5-1 m est intéressante : cet ensemble de sols étudiés indique que les deux tiers du carbone sont localisés dans la couche 0-0,5 m ; la couche à plus de 0,5 m de profondeur contient parfois un stock important, mais dans des conditions pédologiques particulières signalées précédemment. A titre de comparaison les données d'Amazonie sous forêt de la couche 0-0,3 m rapportées par Fujisaki et al., (2015) se situent dans la fourchette de nos mesures en Guyane.

Tableau 11 – Données générales des stocks de carbone des sols (MgC ha⁻¹) des inventaires (n=69) CarSGuy & RMQS_Guy, couches de 0 à 1 m. (a) tous types de sols confondus ; (b) par grands types de sols.

a	Σ 0-1	0-0,3	0-0,3 % Σ	0,3-0,5	0,3-0,5 % Σ	0,5-1	0,5-1 % Σ
MIN	24,12	12,27	3,79	4,36	3,30	0,67	1,99
Q1	85,01	40,57	44,38	15,53	16,89	23,55	24,00
MOY	128,24	62,72	52,20	25,77	19,84	44,97	31,63
MED	111,27	56,58	51,76	20,18	19,38	34,20	29,47
Q3	143,56	72,08	61,40	30,16	22,20	47,15	36,61
MAX	439,69	288,58	86,92	151,11	36,36	388,50	92,90
n	69	69		69		61	

b	MIN	Q1	MOY	MED	Q3	MAX	n
Ferrallitisols							

Σ0-1	64,92	104,63	138,61	129,34	166,02	249,52	37
0-0,3	32,69	51,01	67,85	64,75	76,89	133,22	37
0,3-0,5	9,13	18,99	29,14	25,46	39,27	62,57	37
0-0,5	45,79	72,18	96,99	88,23	106,38	182,75	37
0,5-1	11,72	25,09	42,78	33,95	54,09	143,15	36
Réductisols							
Σ0-1	61,87	85,00	125,86	101,20	116,62	439,69	16
0-0,3	32,34	47,27	73,31	57,26	75,35	288,58	16
0,3-0,5	8,09	15,64	28,15	19,32	23,26	151,11	16
0-0,5	48,74	63,14	101,46	71,75	95,82	439,69	16
0,5-1	17,13	22,70	35,49	28,82	46,34	73,86	11
Fluvisols & Rédoxisols							
Σ0-1	24,12	53,18	138,04	88,86	116,79	418,18	10
0-0,3	15,86	25,96	48,92	31,14	44,28	194,56	10
0,3-0,5	7,55	13,86	21,23	15,06	18,42	75,20	10
0-0,5	24,12	36,95	70,15	45,99	62,71	269,76	10
0,5-1	3,59	33,95	84,86	37,40	55,39	388,50	8
Podzosols							
Σ0-1	25,33	29,61	54,31	45,64	70,22	106,57	6
0-0,3	12,27	20,30	25,85	27,84	29,45	39,35	6
0,3-0,5	4,36	4,46	6,18	5,00	7,87	9,61	6
0-0,5	17,53	24,95	32,02	32,20	37,10	48,95	6
0,5-1	0,67	6,15	22,28	17,00	33,41	57,62	6

Comparés aux données de sols similaires d'Afrique de l'Ouest (Henry et al., 2015), pour la couche 0-0,3 m, nos mesures montrent des amplitudes similaires. Les valeurs données par Henry et al. (2015) sont :

- pour les Ferrallitisols : moy = 47,9 MgC ha⁻¹, comprise entre 26,1 et 105,3 (n = 64) ;
- pour des Fluvisols : moy = 48,9 MgC ha⁻¹, comprise entre 22,8 et 114,9 (n = 70) ;
- pour les Réductisols : moy = 75,9 MgC ha⁻¹, comprise entre 25,5 et 147,5 (n = 79).

Les données issues de la base de données Valsol_Guy

Après calculs et vérification de la cohérence de distribution des masses de carbone par profil de sol, 170 sites ont été retenus (Tab. 12). Nous disposons de 170 couches de sol 0-0,3 m. Les estimations pour la couche 0-1 m s'appuient sur les données de 106 sites. Notons que les données disponibles ont permis également d'extraire puis de calculer les stocks de couches de sol à des profondeurs supérieures à 1 m, dans ce cas nous avons regroupé dans l'ensemble noté « > 1 m » des horizons pouvant aller jusqu'à 2,5 m.

S'agissant des **Ferrallitisols** la concordance est très bonne avec les mesures des inventaires CarSGuy & RMQS (Tab. 10), bien que légèrement supérieure, de 0,6 MgC ha⁻¹ pour la médiane de la couche 0-0,3 m.

Concernant les **Fluvisols, Réductisols et Rédoxisols**, les écarts apparaissent importants pour l'ensemble 0-1 m, tendance poussée tant par les couches de surface que par les couches profondes. L'observation des descriptions des sols à fort stock montre qu'ils sont souvent décrits comme très organiques. Souvent avec horizons tourbeux, voire des niveaux de tourbes. Dans le cadre de RMQS le choix des sites n'est guidé que par la maille de l'échantillonnage de 16 km, cela comporte un facteur aléatoire, ce qui n'est pas le cas des études comprises dans les données anciennes de Valsol, où les profils sont choisis à dessein comme représentatifs dans le cadre typologique lors de travaux cartographiques. Dans le cadre de CarSGuy le choix des sites ne comprend pas les sols les plus organiques, souvent associés aux bas-fonds à nappe permanente. Nous avons tendance à considérer ici que l'apport des données Valsol nous permet d'étendre notre population à des points que nous n'aurions pas eu à ce stade avec les autres inventaires.

Dans le cas des **Podzosols**, nous ne disposons que des mesures sur 6 sites (Tab. 10). Avec Valsol nous ajoutons 15 sites de Podzosols typiques, avec des horizons A humiques bien développés.

L'écart avec l'inventaire CarSGuy-RMQS est saisissant, plus de 100 MgC ha⁻¹, les études rapportées dans Valsol soulignent des zones où ces podzols sont bien développés sur une série détritique datée d'il y a environ 1,8 MA (entre Pliocène et Pléistocène) formée à partir des dépôts d'un ancien delta. Il peut s'agir aussi de Podzosols de nappe associés aux anciennes barres littorales dunaires sableuses. La pédogénèse et la matière organique des podzols de Guyane ont été bien décrites (Turenne, 1977 ; Blancaneau et al, 1973) et les stocks présentés n'ont rien de surprenant.

Enfin, les données de la base de données Valsol offrent l'occasion de saisir un point important. **Les stocks calculés pour les couches profondes** ne sont pas négligeables, par exemple 19 MgC ha⁻¹ pour les Ferrallitols. La distribution verticale de la concentration de carbone de ces sols suit une exponentielle décroissante avec la profondeur, le système est constamment alimenté en carbone, par un réseau diffus et régulier de racines, bien que le schéma admis soit celui d'une concentration importante des racines à moins d'un mètre en forêt. Chauvel et al., (1992) avaient montré en Amazonie centrale que les arbres s'alimentaient en eau jusqu'à des profondeurs de plus de 5 m en saison sèche. Il semble important de noter, qu'à l'avenir, il faudra prendre en compte le carbone des couches profondes des couvertures ferrallitiques tropicales pour une meilleure compréhension des mécanismes et de la réalité environnementale de l'évolution de ces stocks. Ce qui est pris en compte dans la nouvelle campagne RMQS 2.

Tableau 12 - Statistiques générales des stocks de carbone des sols (MgC ha⁻¹) calculés à partir de la base de données Valsol_Guy (n = 170 pédons)

	MIN	Q1	MOY	MED	Q3	MAX	n
Ferrallitols							
Σ0-100	67,67	104,96	145,34	127,50	168,05	339,69	49
0-0,3	16,23	49,35	76,51	70,34	91,58	275,81	102
0,3-0,5	5,03	19,05	29,32	25,78	31,87	175,89	85
0,5-1	14,17	31,13	43,11	36,80	47,35	126,20	66
>1 m	3,65	14,25	30,52	19,43	40,65	108,23	49
Réductisols							
Σ0-100	42,82	113,53	220,73	150,72	317,38	795,16	29
0-0,3	11,00	47,28	106,42	89,75	113,62	369,53	37
0,3-0,5	3,76	16,33	42,84	28,94	61,92	174,31	31
0,5-1	9,40	25,71	74,59	44,44	91,10	303,17	30
>1 m	4,15	13,63	46,33	23,92	29,69	314,79	12
Fluviosols & Rédoxisols							
Σ0-100	73,49	171,04	385,17	251,04	351,94	1 335,78	13
0-0,3	37,59	60,77	122,84	86,71	137,45	410,33	15
0,3-0,5	13,60	23,42	60,65	32,20	63,36	264,41	15
0,5-1	22,31	54,96	164,67	78,64	145,74	661,04	16
>1 m	12,06	39,22	80,56	75,35	116,83	159,35	5
Podzosols							
Σ0-100	63,89	102,64	163,88	156,82	187,17	313,40	15
SCt0-30	12,55	40,00	66,18	48,42	80,06	181,05	16
30-50	5,35	11,01	24,97	14,68	22,95	85,26	15
50-100	11,51	26,26	58,62	51,16	81,21	159,56	15
>100	16,75	27,54	59,99	38,27	49,33	236,59	12

Agrégation de l'ensemble des données

La Figure 10 suivante présente les statistiques descriptives de l'agrégation des données des stocks 0-1 m. Dans l'histogramme nous n'avons pas fait apparaître les valeurs très élevées au delà de 450 MgC, elles apparaissent dans le diagramme à moustaches. Mis à part les valeurs très élevées, l'histogramme montre une distribution presque normale (médiane = 81,74 et moyenne = 97,34 MgC ha⁻¹).

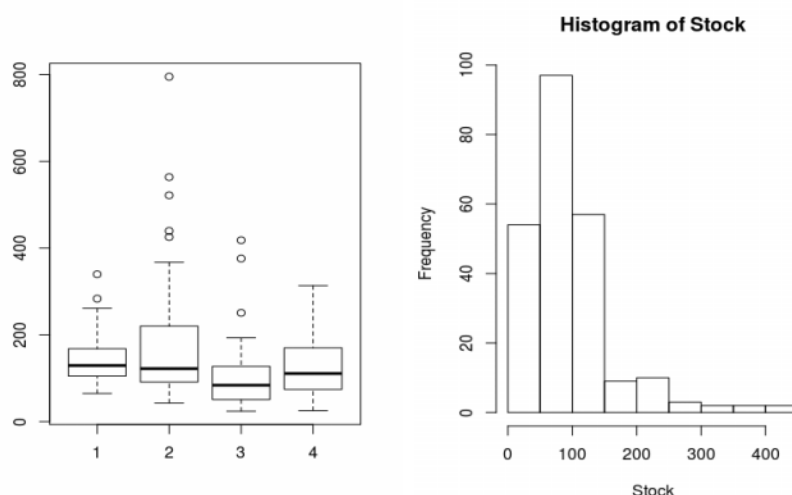


Figure 10 - Diagramme en moustache et histogramme des valeurs ($n = 236$) des stocks de carbone (MgC ha^{-1}) des sols (0-1 m). 1/ Ferrallitisols ; 2/ Réductisols ; 3/ Fluviosols et Rédoxisols ; 4/ Podzosols.

Le fait que les Ferrallitisols aient les stocks les plus élevés est confirmé ($\text{med} = 129,3 \text{ MgC ha}^{-1}$), suivis par les Réductisols ($\text{med} = 122,3 \text{ MgC ha}^{-1}$), les Podzosols ($\text{med} = 110,9 \text{ MgC ha}^{-1}$), enfin les Fluviosols et Rédoxisols ($\text{med} = 83,98 \text{ MgC ha}^{-1}$).

Distribution spatiale des stocks de carbone

Les valeurs de stocks distribués selon quatre classes ont été affectées à chaque unité correspondante de la carte des sols et à la carte des unités morpho-pédologiques. Les cartes (cartes 3 à 7 en annexe représentent les cartes des stocks de carbone obtenues pour les couches 0-0,3 m et 0-0,5 m et 0-1 m.

Cartographie selon les UC pédologiques (Cartes T2)

- Couche 0-0,3 m (carte 4)

Quatre classes de stocks sont sélectionnées allant de 28 MgC ha^{-1} à 178 MgC ha^{-1} . Les minimums se situent le long du littoral sur la plaine côtière récente où l'on trouve exclusivement des sols sableux. Les stocks deviennent plus hétéroclites à mesure que l'on s'éloigne du front de mer, avec une majorité de Ferrallitisols au stock compris entre 47 et 67 MgC ha^{-1} . Sur les zones les plus vallonnées de l'ouest (pentes, Ferrallitisols remaniés) ainsi que le long des fleuves on retrouve des stocks allant de 67 à 98 MgC ha^{-1} . Enfin, les maximums (98 à 178 MgC ha^{-1}) sont observés dans les Ferrallitisols à drainage vertical bloqué qui stockent plus de C en surface, ainsi que dans des Fluviosols, Réductisols présentant des horizons tourbeux. Ces valeurs sont dans l'amplitude rapportée dans l'Atlas des sols d'Amérique Latine et des Caraïbes (Gardi et al., 2014), valeurs estimées par les travaux FAO (2002) à partir d'une base de données mondiale des sols.

- Couche 0-0,5 m (carte 5)

Ici, les mêmes tendances sont observées avec un minimum de 42 MgC ha^{-1} et un maximum de 246 MgC ha^{-1} . Les classes de valeurs de stocks sont respectivement comprises entre 64-95, 95-127 et $127-246 \text{ MgC ha}^{-1}$. La principale différence avec la carte précédente concerne les sols aux stocks les plus élevés qui deviennent ici les sols aux stocks les plus faibles. Ceci confirme que l'essentiel du C dans ces sols se situe en surface en raison des discontinuités de drainage. Cette carte montre également l'importance de l'étude des stocks jusqu'à 0,5 m de profondeur puisque 50 % du C présent jusqu'à 1 m y est concentré.

- Couche 0-1 m (carte 3)

Les minimums sont compris entre 38 et 94 MgC ha^{-1} , ils sont observés pour les sols les moins profonds situés sur les sols organiques de l'est guyanais. Les Ferrallitisols qui représentent la

majorités des sols présent sur le territoire et qui voient leurs stocks diminuer avec la profondeur, ont quant à eux des valeurs intermédiaires échelonnées entre 94 à 133 MgC ha⁻¹. Les Ferrallitisols remaniés, situés sur les versants ou constituants des vallons possèdent des stocks entre 133 et 183 MgC ha⁻¹. La bande côtière, présente les mêmes caractéristiques de stocks. Les polders de Mana et les Réductisols de l'est constituent des sols aux niveaux de SOC intéressants avec des valeurs comprises en 183 et 237 MgC ha⁻¹ de par la présence d'horizons tourbeux. Une fois encore les sols hydromorphes présentant des horizons tourbeux présentent les valeurs de stocks les plus élevés (237-367 MgC ha⁻¹), les valeurs les plus élevées pour 0-1 m se situent dans des Fluviosols, des Réductisols et Rédoxisols de marais (par ex. Kaw), des Thalassosols sous mangroves (ex. Ouanary).

Cartographie selon les UC paysages morpho-pédologiques (Cartes T2)

- Couche 0-0,3 m (carte 7)

Si l'on considère les stocks de C en fonction des paysages morpho-pédologiques la majeure partie du territoire cartographié présente des stocks compris entre 57 et 75 MgC ha⁻¹. Les collines cuirassées ou non de l'est et de St Laurent présentent des valeurs intermédiaires de 75 à 93 MgC ha⁻¹. Les valeurs les plus hautes (111-129 MgC ha⁻¹) correspondent à des paysages de collines en amandes aux sommets souvent cuirassés.

- Couche 0-0,5 m (carte 8)

La même distribution est observée jusqu'à 50 cm avec les valeurs suivantes : 81 à 105, 105-130 et 154 à 178 MgC ha⁻¹.

- Couche 0-1 m (carte 6)

Les minimums sont constitués des paysages de collines et de piémont du socle avec des stocks allant de 104 à 145 MgC ha⁻¹. Considérer les stocks jusqu'à 1 m permet de faire ressortir l'importance des sols de la plaine côtière avec des stocks variant de 145-185 MgC ha⁻¹. Une fois de plus les terrasses fluviales de la Mana et les collines aux sommets souvent cuirassés constituent les réservoirs de C les plus importants (185-226 et 226-266 MgC ha⁻¹).

Ce prisme des paysages permet une simplification de la visualisation des valeurs de stocks, même si pour la couche 0-0,3 m il semble sous-estimer l'importance de certains sols situés sur les terrasses fluviales.

Le tableau 12 résume les propriétés de la cartographie exécutée sur le nord de la Guyane.

Tableau 13 - Propriétés cartographiques des spatialisations des stocks de carbone (MgC) par UC pédologiques et UC morpho-pédologiques, Nord de la Guyane.

Sol	Surface km ²	surface %	Stock 0-1 m	Stock 0-0,5 m	Stock 0-0,3 m
Ferrallisol	4 714,64	43,68	639 099,10	464 107,82	340 211,97
Hydromorphe	3 558,49	32,97	467 721,99	337 431,81	257 063,89
Alluvionnaire	2 169,07	20,10	398 974,61	171 245,22	111 920,71
Podzol	351,33	3,26	43 628,67	25 436,57	18 409,32
Totaux	10 793,54295		1 549 424,36	998 221,42	727 605,90

Paysage morpho-pédologique	Surface km ²	surface %	Stock 0-1 m	Stock 0-0,5 m	Stock 0-0,3 m
La Frange Côtière	535,65	5,28	83 013,41	58 132,37	41 137,26
Terres Hautes sur granites et migmatites	2 800,65	27,60	418 406,18	301 985,49	220 316,18
Terres Hautes sur associations de schistes et conglomérats	1 607,67	15,85	207 553,12	151 429,12	110 380,47
Terres Hautes sur roches anciennement métamorphisées et sur roches ignées	5 202,19	51,27	795 838,78	441 124,43	312 972,47
Totaux	10 146,16		1 504 811,49	952 671,42	684 806,39

Le poids des Ferrallitisols se manifeste également par leur extension géographique, ils couvrent 43,7 % de la superficie. Les Podzosols sont peu représentés, 3,3 %, leurs stocks

représentent 5 % du stock total cartographié. Connaissant le terrain nous pensons que dans certaines zones ils ont été sous estimés dans les cartographies au 1/50 000^{ème}. Boulet et al., (1993) avaient bien montré qu'ils sont l'expression du stade ultime de l'altération de la couverture ferrallitique, mais la représentation cartographique devient alors peu aisée, à moins d'aller à des représentations au 1/10 000^{ème} ou au 1/20 000^{ème}. Pour les évaluations à l'échelle de tout le territoire nous attribuerons 5 % de la superficie aux Podzosols.

La cartographie des stocks selon les grands paysages morpho-pédologiques apporte une lecture intéressante. Le « Paysage de la Frange Côtière » représente 5,3 % de la superficie. Il se caractérise par des alluvions récentes occupées essentiellement par les marais de mangrove et arrière mangrove (forêt à *Pterocarpus officinalis*). Si l'on considère la masse de stocks, le « Paysage de Terres hautes sur roches anciennes métamorphisées et sur roches ignées » représente la plus grande masse de carbone, s'y trouvent les Ferrallitisols les plus argileux, profonds. La seconde unité en masse est celle des « Terres hautes sur granites et migmatites », les Ferrallitisols y sont les plus argilo – sableux.

Zoom sur des zones forestières à vocation agricole

En raison des enjeux sur le territoire, nous avons choisi d'illustrer en sélectionnant deux zones, elles sont incluses dans les « zones agricoles potentielles » (SAR, 2016), en cours de défriche agricole. Ces deux exemples illustrent l'extension de zones agricoles existantes sans prise en compte des contraintes réelles du milieu.

- Zone de Charvein (Carte 9)

On observe ici une grande variabilité des stocks sur cette zone de Charvein classée comme étant à prioriser dans la mise en culture. Ceci induit une grande difficulté dans la gestion de cet espace d'autant que la variabilité des sols et des stocks déjà illustrée à cette échelle l'est plus encore sur le terrain. Par ailleurs on remarque que cette zone se situe sur des zones où les stocks initiaux sont faibles sur des sols podzolisés, ce qui rend d'autant plus difficile la mise en culture de ces sols sensibles.

- Zone de Sinnamary (Carte 10)

Même constat concernant ce zoom sur Sinnamary. Ici s'ajoute le manque de données sur la partie sud de la zone agricole prioritaire. Par ailleurs certains sols s'avèrent très hydromorphes et difficilement exploitables en plus d'être sensibles au passage des engins agricoles.

Une première approximation du stock total des sols du territoire guyanais

A partir de ces premiers résultats, une estimation du stock total de carbone des sols pour la couche 0-1 m guyanais est proposée. Deux modes simples peuvent être suivis :

- **le premier utilise la valeur médiane de stock des sols et la superficie du territoire ;** l'erreur pourrait être illustrée par le coefficient de variation, mais nous préférons souligner une plage de valeurs qui restent cohérentes à partir de l'inventaire réalisé et la détermination des quartiles de la population des valeurs :

Stock médian 0-1 m versus superficie totale = 612,437 Tg avec une fourchette de 389,555 – 915,916 Tg.

- **Le second mode, pour la couche 0-0,3 m prend un classement attribuant à l'ensemble de Ferrallitisols 75 % de la superficie du territoire, 5 % aux Podzosols, 10 % aux Réductisols et Rédoxisols et 10 % aux Fluviosols :**

Stocks 0-1 m par grands groupes de sols versus superficie = 897,353 Tg avec une fourchette de 706,685 – 1 231,616 Tg.

Compte tenu du mode de calcul, le second mode tend à augmenter la valeur du stock du territoire, nous pensons qu'il est plus proche de la réalité dans la mesure où il introduit déjà en partie la variabilité du milieu.

A titre de comparaison les estimations pour la France continentale et la Corse sont de 3 100 Tg (0-0,3 m) (Arrouays et al., 2001). Si nous reprenons les calculs pour la couche 0-0,3 m :

Stock médian (0-0,3 m) versus superficie totale = 484,993 Tg avec une fourchette de 336,453 – 664,940 Tg.

Stocks (0-0,3 m) par grands groupes de sols versus superficie = 493,860 Tg avec une fourchette de 351,707 – 673,245 Tg.

Ainsi les sols du territoire guyanais introduiraient pour 15 % de territoire en plus, entre 11 et 22 % de stock, dans la comptabilité du « carbone des sols » au niveau national.

La question de l'incertitude

La première source d'incertitude peut être liée à la mesure des densités apparentes et donc à l'estimation du stock par unité de surface et couche de sol. Nous avons montré avec les inventaires que nous avons effectués, que l'erreur entre un profil de sol (pédon) et les échantillons moyens était de 8 % sur le stock de la couche ; donc sur l'ensemble des données calculées à partir de la BD Valsol on reste dans le domaine acceptable. Il n'en demeure pas moins que la question de mesure de la densité apparente ne peut être éludée dans toutes nouvelles études, surtout celles liées aux changements d'usage des sols.

Au niveau de la spatialisation, les erreurs sont additives, elles concernent la précision de la représentation de certaines unités cartographiques, et le fait aussi d'avoir utilisé des valeurs médianes par grandes typologies de sols, et donc d'être tributaires de la taille de la population de points de référence utilisés. Nous avons une densité théorique d'un site tous les 45,7 km². L'amélioration de la précision viendra également de l'incrémentation de données sur le terrain. L'approche que nous avons utilisée conseille de garder les fourchettes de classes de stocks et non de figer une valeur à ce stade de la connaissance pour ce territoire.

Conclusion

Les estimations de stocks de carbone total présentées dans cette étude sont la première évaluation pour le territoire de la Guyane. Il s'agit d'une première valorisation des nombreuses études pédologiques existantes et en devenir (RMQS). Le travail exécuté à cette échelle permet d'améliorer les connaissances sur la distribution du carbone des sols, il fournit également des valeurs de référence pour les sols de cette grande région.

Bien entendu la collection de données est à 90 % centrée sur les formations végétales naturelles, forestières. La poursuite de ce type de projet est en cours avec l'intégration de sites cultivés (Projet AEPARS IRD-ADEME-AFD). Cela souligne aussi le caractère exemplaire de l'inventaire, nous pouvons considérer que nous apportons une bonne ligne de base au fond naturel biogéochimique du carbone dans les sols de cette région. Cet inventaire devra être également valorisé comme un référentiel lors tout changement d'usage des sols.

Il convient de retenir l'importance des couches 0-0,5 m, qui viennent conforter les observations internationales qui alertent sur la nécessité d'échantillonner et d'estimer jusqu'au demi-mètre. Mais aussi, les résultats montrent que les stocks sous ces forêts ne sont pas à négliger jusqu'à un mètre de profondeur. Nous avons observé également que les couvertures ferrallitiques ont des stocks à des profondeurs au-delà d'un mètre qui sont significatifs.

S'agissant de la spatialisation, nous avons insisté sur les habitats de végétation et leur relation avec la morpho-pédologie. C'est la phase suivante de ce travail que nous abordons actuellement avec S. Guitet et al., (Réfèrent Outre-mer pour le Service de l'Inventaire Forestier et Environnemental, IGN). Tout le travail va consister à valider les relations entre nos bases de données afin d'affecter des stocks à des habitats dans des zones de référence, faire des validations croisées, puis proposer une spatialisation à l'échelle du territoire. Nous avons déjà testé de telles approches liées à la végétation à Madagascar (Ramifehiarivo et al., 2016 & 2017), elles sont pertinentes, mais à l'échelle de ce projet elles n'étaient pas réalisables.

Prédiction de stocks de carbone sur le moyen et le long terme

Nous présentons dans cette section la trajectoire des stocks de COS d'une série de sites prélevés récemment (CarSGuy & RMQS), en utilisant le modèle RothC, dans le but de pouvoir extrapoler temporellement l'évolution des stocks de COS. L'originalité de l'approche dans le contexte amazonien est d'utiliser les données de restitutions organiques par les agrosystèmes comme données d'entrées du modèle.

Les simulations (Fig. 11) à long terme sont très proches pour Sim1 & 2 étant donné les faibles différences de restitutions organiques. Tout au plus on remarque l'effet lors des 5 premières années des restitutions issues de la couverture forestière apportée en surface du sol pour Sim1.

Trois familles de courbes se dessinent :

- population 1 (n=34), les stocks décroissent régulièrement mais la pente tend vers une asymptote, ou se stabilisent : exemple sites 2 et 5 ;
- population 2 (n=9), les stocks restent constants voire augmentent légèrement, exemple des sites 4/3056 ;
- population 3 (n=21), les stocks diminuent fortement et au bout de 35 ans au moins la moitié du stock initial a été perdu, exemple sites 11/24/3169.

Les résultats des variations de stocks, $\Delta_{C0-35 \text{ ans}}$, sont résumés dans le tableau 14 suivant :

Tableau 14 - Statistiques générales des simulations de variation du stock de carbone de la couche de sol 0-0,3 m 35 ans après déforestation et mise en culture (avec (Sim 1) ou sans (Sim 2) restitution des résidus forestiers)

	Sim 2 (MgC ha ⁻¹)	Sim 1 (MgC ha ⁻¹)	Sim 1 & Sim 2 (t35/t0)
moy	-24,37	-22,65	-0,27
et	29,28	29,29	0,29
méd	-16,76	-15,07	-0,31
Q1	-31,89	-30,14	-0,44
Q2	-8,61	-6,79	-0,22
max	12,84	14,52	1,32
min	-184,75	-183,08	-0,64
n	64	64	128

Les médianes nous donnent une décroissance comprise entre 15 et 17 MgC ha⁻¹ en 35 ans, soit environ 31 % du stock initial de la couche 0-0,3 m, et dans le cadre des familles de simulation :

- pour la population 1, moyenne $\Delta_{C0-35 \text{ ans}} = - 31 \%$, écart-type 9 % (n=34)
- pour la population 2, moyenne $\Delta_{C0-35 \text{ ans}} = + 21 \%$, écart-type 43 % (n=9)
- pour la population 3, moyenne $\Delta_{C0-35 \text{ ans}} = - 49 \%$, écart-type 8 % (n=21)

La population 3 est marquée par des sols ayant des valeurs de stock initial élevées. La variabilité de la population 2 s'explique par la diversité de la nature des sites : Podzolsols, des Réductisols, de lithosols, et quelques sites de Ferrallitisols à tendance hydromorphe.

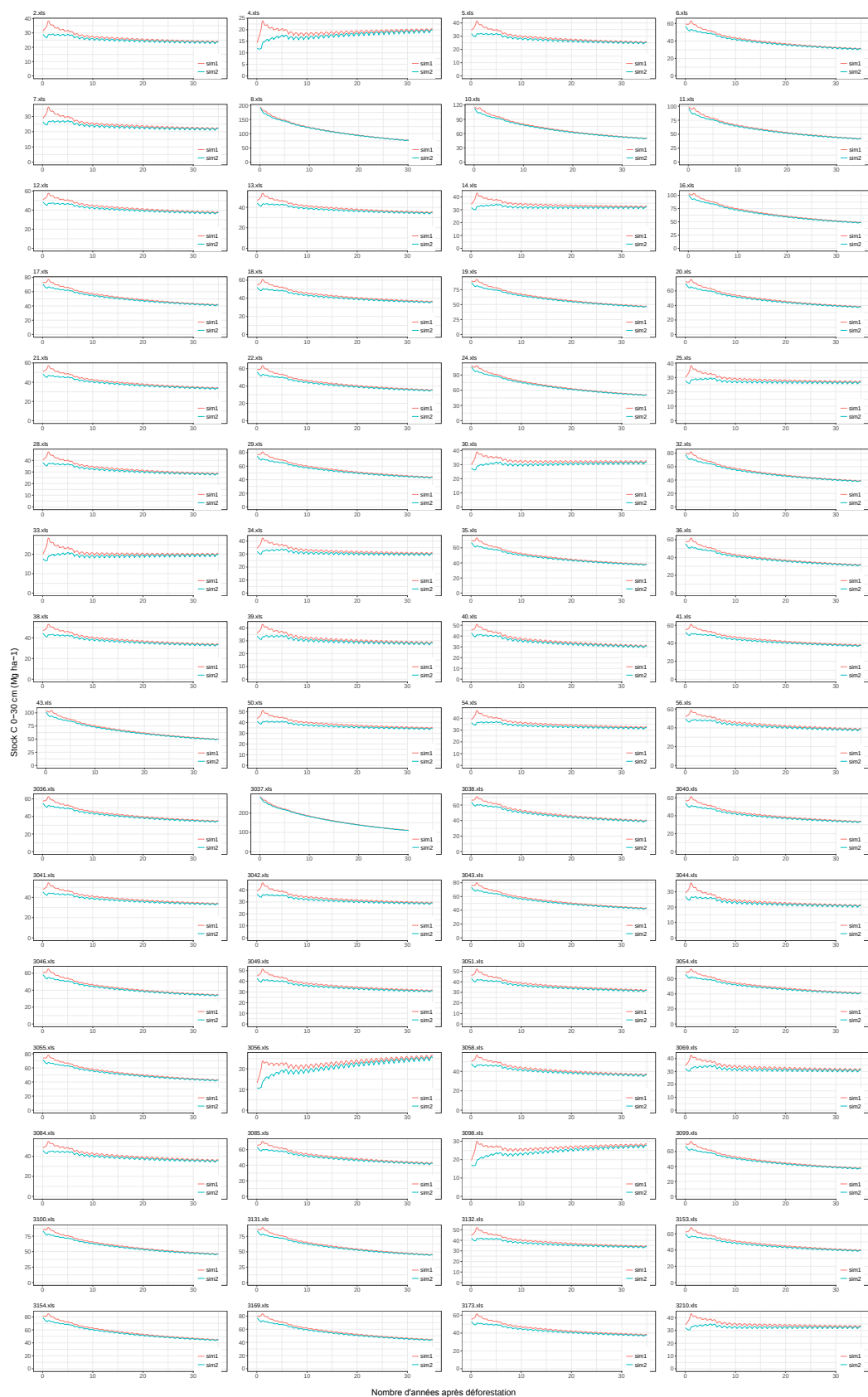


Figure 11 - Simulations du devenir des stocks à long terme (35 ans) de la couche 0-0,3 m de sites CarSGuy et RMQS ; Sim 1 avec restitution initiale de 11,2 MgC ha⁻¹ de résidus de forêt, Sim 2 sans restitution de résidus de forêt (cf détails Tab. 4).



Ces considérations générales conduisent à s'interroger en première approximation sur les effets de certaines covariables : teneur en argile (%), stock de C initial (Mg ha^{-1}), précipitations annuelles (mm), type de sol. La figure 12 illustre la matrice de corrélation, il s'agit bien de la valeur du stock initial qui est la plus marquante sur le ΔC_{0-35} ; la figure 13 suivante illustre la distribution des données de cette relation.

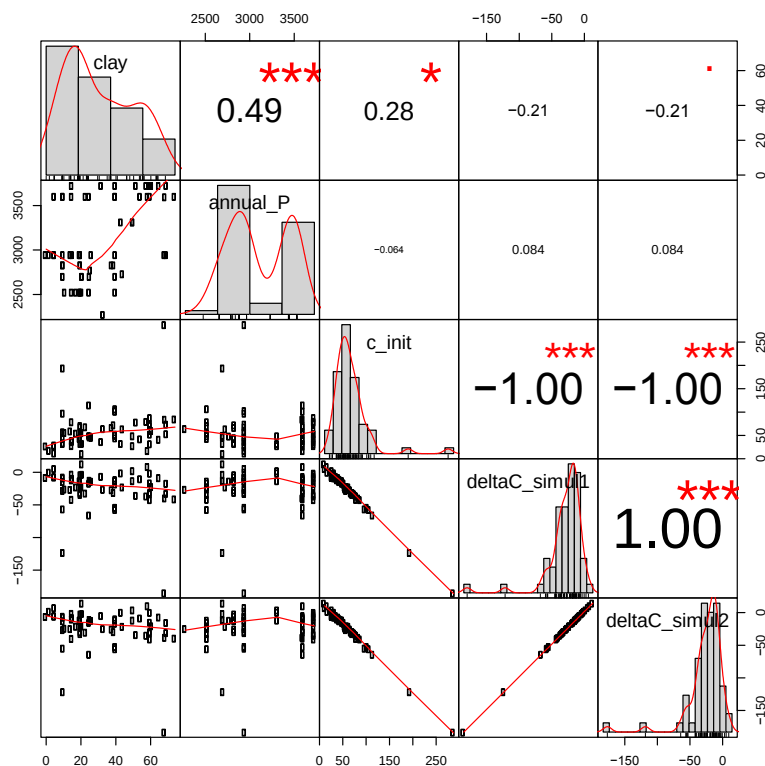


Figure 5 - Matrice de corrélation teneur en argile, stock de carbone initial, stock de carbone en fin de simulation de la couche 0-0,3 m des sites CarSGuy et RMQS et de leurs données pluviométriques.

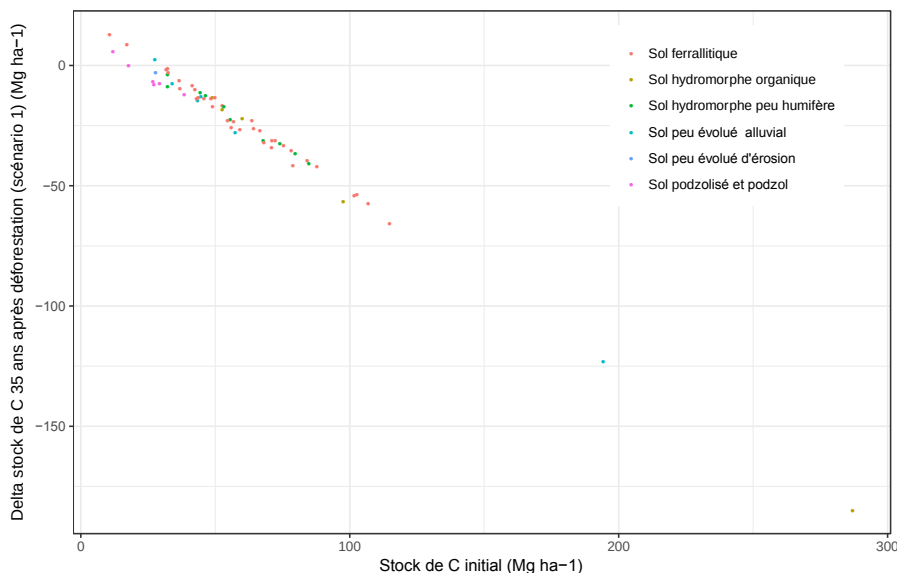


Figure 13 - Variation de stock de carbone en MgC ha^{-1} 35 ans après déforestation (Sim1) des couches 0-0,3 m en fonction du stock initial.

Le poids du formalisme du modèle a sans doute des effets sur les résultats. En effet, la dynamique simulée des stocks de C est fortement liée aux entrées de C dans le système. A l'état d'équilibre, dans les sols forestiers, le modèle estime que les sols ayant des stocks de C peu élevés reçoivent des apports de C faibles, issus de la végétation. Dès lors, si les apports de C des agrosystèmes sont plus élevés que les apports estimés par le modèle sous forêt, les stocks simulés vont donc logiquement augmenter. Par exemple dans le cas des sols podzolisés, dont nous observons les stocks les moins élevés sous forêt.

A l'inverse, la teneur en argile des sols ainsi que les précipitations annuelles, considérées à l'échelle globale comme des déterminants des stocks de C des sols (Jobbágy and Jackson, 2000), n'influencent pas de manière sensible l'évolution simulée des stocks de C suite à la déforestation. Dans le modèle RothC, la teneur en argile influence le partitionnement entre le carbone respiré et le carbone humifié et stabilisé dans le sol. Cependant cette relation n'est pas linéaire, et ce partitionnement est très proche entre des sols à 30 ou 80% d'argile, ce qui peut expliquer que le taux d'argile ne détermine pas la dynamique simulée du C (Coleman and Jenkinson, 1999). Il faut également noter que l'on n'observe pas de relation nette entre les stocks de C mesurés sous forêt et la teneur en argile des sols.

Les précipitations impactent l'humidité du sol et donc la minéralisation du C du sol, cependant cette variable n'influence pas la dynamique simulée des stocks de C suite à la déforestation. Cela peut s'expliquer par la représentation assez grossière de l'humidité du sol dans RothC. Compte tenu des précipitations importantes en Guyane, excédentaires par rapport à l'évapotranspiration durant environ 8 mois (Fig. 1), le coefficient de décomposition lié à l'humidité du sol dans RothC varie peu à l'échelle de la Guyane.

Il est notable de constater que la simulation de la décroissance des stocks est bien centrée sur les moyennes des populations 1 et 2 (et 8-9 %C₁₀). En d'autres termes l'incertitude sur le devenir du carbone suite aux déforestations à partir de ces simulations est acceptable et permet de dresser quelques remarques :

- les niveaux de restitutions de carbone utilisés dans ces simulations, issus des travaux à Pointe Combi (Terres Inovia ex-CETIOM) montrent que de toutes façons les pertes de C seront sensibles, et ce quelque que soit le mode d'usage de terre suite à la déforestation. Seules des stratégies de plantes très productives peuvent remédier cette question qui devient un problème environnemental ;
- la modélisation RothC avait été validée pour le site de Combi (Fujisaki, 2014). Toutefois, des inventaires de stocks de situations dont l'âge du changement d'usage est bien connu devront être effectués pour mettre les simulations à l'épreuve du terrain pour les sites guyanais, et prendre en compte la diversité des modes d'usages des sols et des types de sols ;
- les pertes en C sont les plus rapides dans les premières années après déforestation ; 10 ans après déforestation, la médiane de diminution simulée des stocks est de 7,81 MgC ha⁻¹ avec le scénario 1, soit une diminution des stocks de 16 % dans les 30 premiers centimètres. Cela est dans l'ordre de grandeur de la diminution des stocks de C observée sur le site de Pointe Combi 5 années après déforestation et implantation de cultures annuelles (19 %, Fujisaki et al., 2017) ;
- les variations prédites sont néanmoins plus faibles que celles rapportées dans la littérature des milieux tropicaux humides, probablement en raison des restitutions par les cultures relativement importantes compte tenu des rendements agronomiques élevés, avec notre référentiel de Combi. A notre connaissance ce genre d'étude pour des cultures annuelles est unique en Amazonie et vient renforcer nos premiers résultats à Combi. Nous mettons toutefois en garde contre des extrapolations spatio-temporelles de nos résultats en particulier pour les cultures annuelles, compte tenu d'une part des incertitudes liées à la modification du pédoclimat qui peut influencer le devenir de stocks de COS sur le long terme, et d'autre part des restitutions en carbone probablement plus faibles dans des

systèmes moins optimisés, ou avec des rotations à un seul cycle par an, ce qui renvoie à la seconde remarque ;

- les simulations sont conduites pour la couche 0-0,3 m, à ce stade l'intégration de couches plus profondes ne peut être conduite sans envisager du travail approfondi dans les outils de modélisation (modification du code et intégration plus fine du pédoclimat par ex.) ;
- les bilans de déforestation en contribution de gaz à effet de serre (GES) ne pourront être uniquement comptabilisés au seuls brulis de la biomasse (ressource pour usines biomasses par ex.) et devront comptabiliser la fourchette de pertes de carbone des sols que nous proposons.

Mesure du devenir du stock de carbone d'un site suite à la déforestation ménagée

Le déboisement et la mise en place de systèmes cultivés peuvent changer les stocks de carbone organique des sols (COS), menant à des émissions de gaz à effet de serre et des pertes de fertilité, bien que le COS ait une grande variabilité. Dans les tropiques humides comme le biome Amazonien, les apports en carbone des systèmes cultivés sont rarement quantifiés et décrits, malgré leur contribution majeure à la dynamique du SOC après le déboisement.

Nous rappelons quelques résultats exemplaires issus des premières phases de cette étude et publiés en 2017 (Fujisaki et al.). Nous avons évalué la dynamique du COS avec des mesures répétées dans la couche 0-0,3 m jusqu'à cinq ans après le déboisement dans un site diachronique de Guyane française (Pointe Combi), défrichés avec une méthode sans feu associée à de grands apports de débris boisés (BRF). Trois agrosystèmes ont été étudiés :

- une année avec rotation maïs/soja et labour (SC)
- une année avec rotation maïs/soja et sans labour (SD)
- une prairie de fauche (P).

Les apports en carbone à la surface des différents agrosystèmes ont été mesurés. En plus de l'évaluation des SOC, nous avons mesuré les stocks de carbone racinaires et effectué des mesures de $\delta^{13}\text{C}$ dans le sol de la prairie (afin de quantifier la contribution des apports prairiaux au stocks de COS). Nous avons trouvé une nette augmentation du SOC jusqu'à 1,5 ans après le déboisement grâce aux apports de débris de bois, mais ces apports de C ont été rapidement minéralisés et contribuent peu à l'approvisionnement du COS 5 ans après le déboisement. Les stocks de COS en prairies ne diffèrent pas de ceux observés sous forêt malgré les grandes exportations de foin. Grâce aux nombreux apports racinaires, le COS-C4 (associé aux apports par la prairie) dans la prairie était de $10,4 \text{ MgC ha}^{-1}$ 5 ans après déboisement (soit 18,7 % du SOC total). Pour les cultures annuelles, 5 ans après que le déboisement, les SOC ont diminué en moyenne de 18,6 % comparé à la forêt. Le COS n'a pas varié avec le labour de sol puisque les apports de C à la surface étaient semblables dans les systèmes SC et SD. Les COS inférieurs des systèmes cultivés en comparaison avec ceux de la prairie s'expliquent par des restitutions de C moins importantes dans ces premiers systèmes et un taux plus élevé de la vitesse minéralisation de la matière organique (Fujisaki et al., 2017).

Résultats des mesures de masses volumiques des différentes couches de sol

Le tableau 15 rappelle des valeurs de masses volumiques mesurées aux différentes dates. A T8, les masses volumiques ont peu évolué depuis la dernière date de mesures en T5.

Tableau 15 – Masses volumiques des couches de sol dans les différentes couches de sols sous forêt et sous systèmes cultivés (Prairie P, cultures annuelles en Semis conventionnel SC ou en semis direct SD, P-Ex-P parcelle sous prairie initialement sous prairies, P-Ex-SC parcelle sous prairie initialement sous cultures annuelles en SC, P-Ex-SD parcelle sous prairie initialement sous cultures annuelles en SD). Les moyennes sont suivies de l'erreur standard (n=24). Les comparaisons de moyennes ont été effectuées entre les trois systèmes de culture pour chaque date et chaque couche de sol. Les lettres minuscules correspondent aux groupes statistiques déterminés après ANOVA et test HSD de Tukey ($P < 0,05$). Les lettres capitales correspondent aux comparaisons Forêt-système de culture (test de Dunnett, $P < 0,05$). Les lettres sont en italique si l'analyse a été non paramétrique (test de Kruskal-Wallis, $P < 0,05$).

Date	Système	Densité apparente g cm ⁻³			
		0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
T0	Forêt	1,02 ± 0,04 A	1,23 ± 0,03 A	1,35 ± 0,02 A	1,47 ± 0,01 A
T1	P	1,03 ± 0,06 aA	1,25 ± 0,04 aA	1,40 ± 0,03 aA	1,51 ± 0,03 aA
	SC	1,03 ± 0,05 aA	1,32 ± 0,04 aA	1,43 ± 0,03 aA	1,52 ± 0,03 aA
	SD	1,21 ± 0,03 bB	1,33 ± 0,05 aA	1,48 ± 0,03 aB	1,56 ± 0,03 aA
T1,5	P	1,17 ± 0,04 aA	1,27 ± 0,04 aA	1,39 ± 0,03 bA	1,49 ± 0,03 bA
	SC	1,13 ± 0,06 aA	1,33 ± 0,04 aA	1,48 ± 0,03 aB	1,61 ± 0,03 aB
	SD	1,18 ± 0,04 aA	1,38 ± 0,03 aA	1,47 ± 0,02 abB	1,54 ± 0,02 abA
T2	P	1,04 ± 0,04 aA	1,28 ± 0,05 aA	1,39 ± 0,03 aB	1,50 ± 0,03 aA
	SC	1,05 ± 0,04 aA	1,24 ± 0,05 aA	1,45 ± 0,03 aB	1,57 ± 0,02 aB
	SD	1,17 ± 0,04 aB	1,35 ± 0,04 aA	1,47 ± 0,04 aB	1,57 ± 0,01 aB
T3	P	1,12 ± 0,04 aA	1,40 ± 0,03 cA	1,43 ± 0,03 bA	1,47 ± 0,04 aA
	SC	1,22 ± 0,04 aB	1,32 ± 0,03 bA	1,52 ± 0,02 aA	1,54 ± 0,02 aB
	SD	1,22 ± 0,04 aB	1,43 ± 0,02 aB	1,54 ± 0,02 aB	1,58 ± 0,02 aB
T4	P	1,05 ± 0,03 bA	1,32 ± 0,04 aB	1,51 ± 0,03 aB	1,49 ± 0,02 aA
	SC	1,25 ± 0,03 aB	1,44 ± 0,02 aB	1,55 ± 0,01 aB	1,55 ± 0,02 aB
	SD	1,18 ± 0,03 aB	1,44 ± 0,02 aB	1,52 ± 0,02 aB	1,56 ± 0,01 aB
T5	P	1,11 ± 0,03 bA	1,38 ± 0,02 aB	1,43 ± 0,02 bB	1,43 ± 0,04 bA
	SC	1,23 ± 0,04 aB	1,37 ± 0,03 aB	1,52 ± 0,02 aB	1,53 ± 0,02 abA
	SD	1,23 ± 0,03 aB	1,42 ± 0,02 aB	1,54 ± 0,02 aB	1,54 ± 0,02 aA
T8	P-ex-P	0,99 ± 0,04	1,39 ± 0,02	1,46 ± 0,02	1,51 ± 0,02
	P-ex-SC	1,17 ± 0,04	1,45 ± 0,02	1,55 ± 0,01	1,55 ± 0,01
	P-ex-SD	1,12 ± 0,03	1,43 ± 0,02	1,51 ± 0,02	1,56 ± 0,02

Résultats de mesures des teneurs en C organiques des différentes couches de sol

Les teneurs en carbone organique mesurées aux différentes dates sont rappelées dans le tableau 16. Entre T5 et T8, les teneurs en carbone organique ont augmenté dans toutes les couches et pour toutes les modalités agricoles.

Tableau 16 - Teneur en C de la terre fine < 2 mm dans les différentes couches de sols sous forêt et sous systèmes cultivés jusqu'à 8 ans après déforestation (Prairie P, cultures annuelles en Semis conventionnel SC ou en semis direct SD, P-Ex-P parcelle sous prairie initialement sous prairies, P-Ex-SC parcelle sous prairie initialement sous cultures annuelles en SC, P-Ex-SD parcelle sous prairie initialement sous cultures annuelles en SD). Les moyennes sont suivies de l'erreur standard (n=24). Les comparaisons de moyennes ont été effectuées entre les trois systèmes de culture pour chaque date et chaque couche de sol. Les lettres minuscules correspondent aux groupes statistiques déterminés après ANOVA et test HSD de Tukey ($P < 0,05$). Les lettres capitales correspondent aux comparaisons Forêt-système de culture (test de Dunnett, $P < 0,05$). Les lettres sont en italique si l'analyse a été non paramétrique (test de Kruskal-Wallis, $P < 0,05$).

Date	Système	Teneur en C (terre fine < 2mm) / g 100g sol ⁻¹			
		0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-30 cm

T0	Forêt	2,68 ± 0,15 A	1,81 ± 0,12 A	1,43 ± 0,07 A	1,05 ± 0,03 A
T1	P	2,35 ± 0,13 aA	2,22 ± 0,18 aA	1,63 ± 0,06 aA	1,34 ± 0,06 aB
	SC	2,72 ± 0,19 aA	2,29 ± 0,20 aA	1,68 ± 0,11 aA	1,28 ± 0,07 aB
	SD	2,56 ± 0,19 aA	2,16 ± 0,15 aA	1,68 ± 0,09 aA	1,28 ± 0,07 aB
T1,5	P	2,64 ± 0,16 aA	2,40 ± 0,08 aB	1,77 ± 0,08 aA	1,39 ± 0,07 aB
	SC	2,78 ± 0,14 aA	2,34 ± 0,13 aB	1,72 ± 0,11 aA	1,21 ± 0,07 aA
	SD	3,00 ± 0,22 aA	2,25 ± 0,14 aB	1,69 ± 0,09 aA	1,29 ± 0,10 aB
T2	P	2,00 ± 0,08 aB	2,05 ± 0,08 aA	1,63 ± 0,07 aA	1,21 ± 0,07 aB
	SC	2,03 ± 0,08 aB	1,91 ± 0,07 abA	1,46 ± 0,07 abA	1,11 ± 0,05 abA
	SD	1,93 ± 0,08 aB	1,72 ± 0,06 bA	1,31 ± 0,03 bA	1,02 ± 0,03 bA
T3	P	2,16 ± 0,07 aB	1,97 ± 0,06 aA	1,44 ± 0,08 aA	1,08 ± 0,08 aA
	SC	1,84 ± 0,06 bB	1,86 ± 0,05 aA	1,34 ± 0,06 aA	0,97 ± 0,05 aA
	SD	1,84 ± 0,06 bB	1,60 ± 0,04 bA	1,14 ± 0,03 bB	0,89 ± 0,03 aA
T4	P	2,30 ± 0,07 aB	2,07 ± 0,08 aA	1,55 ± 0,08 aA	1,13 ± 0,07 aA
	SC	1,86 ± 0,06 bB	1,75 ± 0,04 bB	1,34 ± 0,04 bA	0,98 ± 0,04 bB
	SD	2,12 ± 0,07 aB	1,68 ± 0,06 bB	1,21 ± 0,03 bB	0,89 ± 0,02 bB
T5	P	2,17 ± 0,07 aB	2,02 ± 0,08 aA	1,50 ± 0,07 aA	1,08 ± 0,05 aA
	SC	1,82 ± 0,05 bB	1,75 ± 0,05 bA	1,26 ± 0,06 bA	0,90 ± 0,04 bB
	SD	1,99 ± 0,07 abB	1,66 ± 0,05 bA	1,21 ± 0,03 bB	0,91 ± 0,03 bB
T8	P-ex-P	2,85 ± 0,14	2,31 ± 0,16	1,82 ± 0,14	1,31 ± 0,09
	P-ex-SC	2,27 ± 0,14	1,79 ± 0,11	1,39 ± 0,08	1,01 ± 0,05
	P-ex-SD	2,36 ± 0,12	1,84 ± 0,13	1,39 ± 0,08	1,01 ± 0,05

Résultats de mesures des stocks de C organiques des différentes couches de sol

Les stocks de carbone organique mesurés aux différentes dates sont rappelés dans le tableau 17. Entre T5 et T8 les stocks en carbone organique ont augmenté dans toutes les couches et pour toutes les modalités en conséquence de l'augmentation des teneurs.

Tableau 17 - Stocks de COS de la terre fine (C<2) dans les différentes couches de sols sous forêt et sous systèmes cultivés jusqu'à 8 ans après déforestation. Dans les systèmes cultivés les stocks sont exprimés à masse équivalente du sol sous forêt. Les moyennes sont suivies de l'erreur standard (n=24). Les comparaisons de moyennes ont été effectuées entre les trois systèmes de culture pour chaque date et chaque couche de sol. Les lettres minuscules correspondent aux groupes statistiques déterminés après ANOVA et test HSD de Tukey (P < 0,05). Les lettres capitales correspondent aux comparaisons Forêt-système de culture (test de Dunnett, P < 0,05). Les lettres sont en italique si l'analyse a été non paramétrique (test de Kruskal-Wallis, P < 0,05).

Date	Système	Stock COS C<2 ; t ha ⁻¹			
		0-5 cm	5-10 cm	10-20	20-30
T0	Forêt	12,4 ± 0,6 A	10,5 ± 0,6 A	17,6 ± 0,6 A	14,4 ± 0,4 A
T1	P	11,1 ± 0,7 aA	13,0 ± 1,1 aA	19,6 ± 0,8 aA	17,6 ± 0,8 aB
	SC	12,9 ± 0,9 aA	14,1 ± 1,3 aA	20,2 ± 1,2 aA	16,9 ± 0,9 aA
	SD	12,0 ± 0,9 aA	13,4 ± 1,1 aA	20,4 ± 1,1 aA	17,5 ± 1,0 aB
T1,5	P	12,4 ± 0,7 aA	14,2 ± 0,5 aB	21,5 ± 0,9 aB	18,6 ± 0,9 aB
	SC	13,1 ± 0,7 aA	13,7 ± 0,8 aB	20,6 ± 1,3 aB	15,6 ± 1,0 aA
	SD	14,0 ± 1,0 aA	13,3 ± 0,7 aB	20,4 ± 1,0 aB	16,8 ± 1,0 aA
T2	P	9,3 ± 0,4 aB	11,6 ± 0,4 aA	19,7 ± 0,9 aA	15,7 ± 0,9 aA
	SC	9,5 ± 0,4 aB	11,0 ± 0,4 abA	17,6 ± 0,9 abA	14,3 ± 0,7 aA
	SD	9,0 ± 0,4 aB	10,2 ± 0,4 bA	15,9 ± 0,4 bA	13,4 ± 0,4 aA
T3	P	10,1 ± 0,4 aB	11,4 ± 0,4 aA	17,4 ± 1,0 aA	14,9 ± 1,0 aA

	SC	8,6 ± 0,3 bB	10,7 ± 0,3 aA	17,0 ± 0,8 abA	13,9 ± 0,7 aA
	SD	8,8 ± 0,3 bB	9,5 ± 0,2 bA	14,2 ± 0,3 bB	12,1 ± 0,3 aA
T4	P	10,9 ± 0,4 aB	12,1 ± 0,5 aA	18,8 ± 1,1 aA	15,6 ± 1,0 aA
	SC	8,8 ± 0,3 bB	10,3 ± 0,2 bA	17,1 ± 0,5 aA	13,9 ± 0,5 abA
	SD	10,1 ± 0,4 aB	10,1 ± 0,4 bA	15,1 ± 0,4 bB	12,7 ± 0,3 bB
T5	P	10,9 ± 0,4 aA	12,0 ± 0,5 aB	18,4 ± 0,9 aA	14,8 ± 0,7 aA
	SC	8,8 ± 0,3 bB	10,5 ± 0,3 bA	16,3 ± 0,4 aA	13,1 ± 0,5 aA
	SD	8,8 ± 0,3 bB	9,4 ± 0,2 bA	15,9 ± 0,5 aA	13,1 ± 0,3 aA
T8	P	13,4 ± 0,7	13,4 ± 0,9	22,2 ± 1,7	17,6 ± 1,1
	P-Ex-SC	10,9 ± 0,7	10,9 ± 0,5	17,7 ± 0,9	15,1 ± 0,7
	P-Ex-SD	10,5 ± 0,6	10,4 ± 0,7	17,9 ± 0,9	14,7 ± 0,7

Tableau 18 - Stocks de COS de la terre fine (C<2) dans les 30 premiers cm de sols sous forêt et en systèmes cultivés jusqu'à 8 ans après déforestation. Statistique : idem Tableau 5.

Date	Système	Stock COS 0-30 cm ; t ha ⁻¹ C<2
T0	Forêt	55,0 ± 1,6 A
T1	P	61,4 ± 2,5 aA
	SC	64,0 ± 3,9 aA
	SD	63,3 ± 3,5 aA
T1,5	P	66,6 ± 3,5 aB
	SC	62,9 ± 3,3 aA
	SD	64,5 ± 3,2 aA
T2	P	56,3 ± 2,1 aA
	SC	52,4 ± 2,1 abA
	SD	48,4 ± 1,2 bA
T3	P	53,8 ± 2,5 aA
	SC	50,3 ± 1,1 abA
	SD	44,7 ± 1,1 bB
T4	P	57,4 ± 2,6 aA
	SC	50,1 ± 1,2 abB
	SD	47,9 ± 1,1 bB
T5	P	55,4 ± 2,0 aA
	SC	48,7 ± 1,2 bB
	SD	47,4 ± 1,0 bB
T8	P	66,6 ± 4,5
	P-Ex-SC	54,7 ± 2,8
	P-Ex-SD	53,6 ± 2,9

Simulation de l'évolution des stocks de carbone à long terme

Le modèle RothC, paramétré dans le cadre de la thèse de Kenji Fujisaki (CIFRE IRD/CETIOM ex Terres Inovia) (section 2.4), peut nous aider à simuler l'évolution des stocks de carbone des sols selon l'utilisation des terres et l'historique des parcelles converties pour un usage agricole (cultures annuelles et prairie fauchée) (Fig. 13). Le modèle intègre les entrées de C mesurées (biomasse aérienne) et estimées (biomasse racinaire).

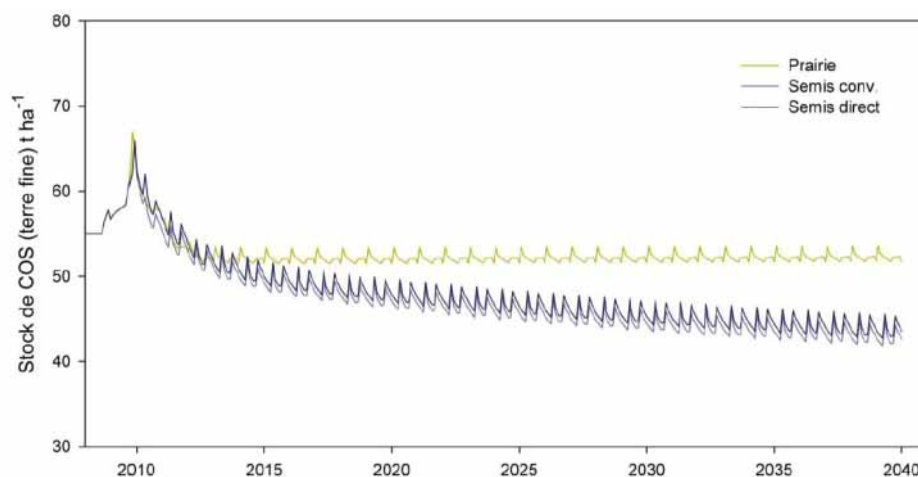


Figure 13 - Simulation à long terme des stocks de carbone organique du sol dans les 3 agrosystèmes de Combi dans la couche 0-30 cm, à partir des données de restitution en C mesurées pour l'année 2013 (extrait de la thèse de K. Fujisaki, 2014).

Le modèle paramétré a été utilisé pour simuler l'évolution du stock de carbone sous prairie en T8 (Fig. 14). Les restitutions de biomasse ayant été inférieures sur la période T5 à T8, le modèle simule une diminution du stock de C en T8

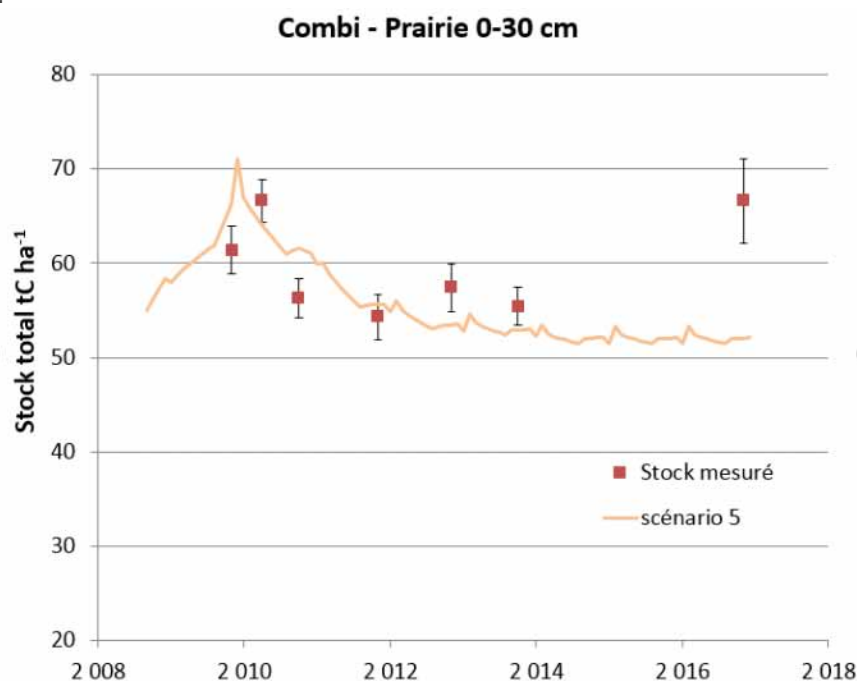


Figure 6 - Simulation à moyen terme des stocks de carbone organique du sol dans l'agrosystème prairial pour la couche 0-30 cm, à partir des données de restitution en C mesurées chaque année.

Des simulations ont également été effectuées pour les parcelles sous cultures annuelles puis sous prairie à partir d'avril 2015, en tenant compte des entrées de biomasses mesurées (aériennes) et estimées (racines) (données non montrées). Une légère augmentation des stocks de C est alors temporairement visible en raison de la forte production de biomasse des graminées dans l'année suivant leur implantation sur les parcelles, cependant le modèle ne simule pas une augmentation aussi importante que celle qui a été mesurée en T8 (Fig. 14).

Discussion

Même si l'on pouvait s'attendre à une augmentation des stocks de carbone organique dans les sols après l'implantation de la prairie d'*Urochloa ruziziensis* dans les parcelles utilisées auparavant par une rotation à double cultures annuelles, l'ampleur de l'augmentation mesurée en T8 paraît très surprenante. De plus, les simulations avec le modèle RothC, paramétré pour le site de Combi, ne parviennent pas à reproduire cette augmentation de stock.

Après analyse fine des résultats, on peut supposer que les teneurs en C sont biaisées, ce qui semble conforté par l'ampleur inédite des variations de teneurs en T8 (Tab.15). Après discussion avec le personnel du LAMA en charge du traitement de la terre (tamisage) et de l'analyse des échantillons, le problème proviendrait de la phase de traitement des échantillons. Le tamisage, effectué par un manœuvre en emploi temporaire au laboratoire, pourrait avoir été effectué avec moins de minutie que précédemment. Des racelles de graminées (très nombreuses sous ce type de graminées) pourraient avoir été présentes dans la terre fine et broyées avant passage à l'analyseur, entraînant une surestimation des teneurs en carbone de la terre fine. Des analyses du C de la fraction 20-2000 μm obtenue par fractionnement granulométrique pourraient nous permettre de confirmer cette hypothèse.

Il apparaît ainsi primordial, avant toute interprétation, de refaire des mesures des teneurs en carbone sur les échantillons de terre fine dépourvus de fragments végétaux (si possible) et mettre à la programmation le prélèvement fin 2018, ce qui fera 10 ans pour ce site expérimental.

Des échantillons avaient été prélevés en T6 (juste avant l'implantation de prairie temporaire) mais ces sols ne seront analysés que dans les prochaines séquences. Nous pourrions être amenés à traiter ces échantillons supplémentaires en vue d'affiner notre compréhension des dynamiques du carbone des sols. Par ailleurs ces mesures pourraient être complétées par des analyses isotopiques de carbone sur les échantillons prélevés sous prairie en T8 ou $T > 8$. Des travaux sont donc à prévoir avant de pouvoir mieux contraindre l'effet de la prairie temporaire sur l'évolution des stocks de C dans le cadre de rotation de cultures annuelles & prairies fauchées.

Prédiction des stocks de C du sol par Spectrométrie Infra-Rouge (SPIR) de terrain, sur carottes prélevées à la tarière à main (StockSpir)

Prédictions avec population d'étalonnage et population de validation

Avec la partition "pédologique" Cal1Val1, en appliquant le modèle construit avec les échantillons d'étalonnage à ces mêmes échantillons (c'est la calibration simple), on a obtenu des prédictions satisfaisantes du stock de carbone :

SEC = 3,6-4,4 gC dm⁻³ (erreur de prédiction) pour une moyenne de 12 gC dm⁻³ par échantillon, R²cal = 0,64-0,77, RPDcal = 1,7-2,1 (ratio de l'écart type à l'erreur).

Mais en validation croisée sur la population de calibration puis en validation externe, où les échantillons ne contribuent pas à leur prédiction, on a obtenu de mauvaises prédictions :

SECV = 5,1-6,4 gC dm⁻³ pour la même moyenne, SEP = 10-14 gC dm⁻³ pour une moyenne de 15 gC dm⁻³ (population de validation), R²cv ≤ 0,55 et R²val ≤ 0,51, RPDcv < 1,5 et RPDval < 1,2 (Tableau 18).

Les échantillons du profil de validation 41, à teneur en carbone importante, ont été particulièrement mal prédits. Sur l'ACP construite avec les échantillons d'étalonnage, on a remarqué que ces échantillons étaient éloignés des échantillons de calibration, qui les représentaient donc mal, ce qui explique qu'ils soient mal prédits (cf. plus bas).

Pour la partition Cal2Val2, on a déplacé les six échantillons de ce profil de la population de validation à la population d'étalonnage. La qualité des prédictions a peu changé en calibration :

SEC = 3,5-4,9 gC dm⁻³ pour une moyenne de 13 gC dm⁻³, R²cal = 0,68-0,83 et RPDcal = 1,8-2,4 en général (sauf, inexplicablement, pour None001, sans prétraitement, où les prédictions étaient mauvaises).

Les prédictions se sont nettement dégradées en validation croisée, du fait qu'on a ajouté dans la population d'étalonnage les échantillons 41 difficiles à prédire :

SECV = 7-9 gC dm⁻³, R² < 0,3 et RPDcv < 1,2.

En revanche, et logiquement, les prédictions ont été sensiblement améliorées en validation externe, du fait que les échantillons difficiles à prédire en ont été retirés :

SEP = 5,5 gC dm⁻³ avec SNV001 (assez inexplicablement) sinon 7-10 gC dm⁻³, pour une moyenne de 13 gC dm⁻³, R²val = 0,68 avec SNV001 sinon ≤ 0,44, RPDval = 1,64 avec SNV001 sinon ≤ 1,3 (Tableau 18).

Avec la partition "spectrale" Cal3Val3, les étalonnages ont été mieux ajustés :

SEC = 2,8-4,2 gC dm⁻³ en général (mais > 8 gC dm⁻³ avec None001) pour une moyenne de 14 gC dm⁻³, donc un peu plus élevée (12-13 gC dm⁻³ précédemment), R²cal = 0,8-0,9 et RPDcal = 2,2-3,3 (sauf avec None001).

La validation croisée a été à peine plus précise qu'auparavant, médiocre encore :

SECV = 6-8 gC dm⁻³ (mais ≈ 9 gC dm⁻³ avec None001), R²cv ≤ 0,57 et RPDcv ≤ 1,53.

La validation externe n'a pas été améliorée :

SEP = 5-11 gC dm⁻³ pour une moyenne de 10 gC dm⁻³, R²val ≤ 0,51 et RPDval < 1,4 (Tableau 18).

Prédiction des échantillons d'un profil à partir des autres profils

Pour cette procédure CalVal4, les échantillons de chaque profil ont été prédits à partir d'un étalonnage utilisant les échantillons de tous les autres profils. Il s'agit donc d'une validation croisée laissant à chaque fois un profil de côté. Tous les échantillons ont fait l'objet de prédiction, à la différence des procédures précédentes, où certains échantillons étaient réservés à l'étalonnage.

En calibration, on a obtenu :

SEC = 3,5-6,4 gC dm⁻³ pour une moyenne de 13 gC dm⁻³, R²cal = 0,5-0,8 et RPDval = 1,4-2,5 ;

et en validation croisée :

SECV = 6,6-8,2 gC dm⁻³, R²cv ≤ 0,43 et RPDcv ≤ 1,33 (la validation externe est ici similaire à la validation croisée ; Tableau 18 et Figure 15).

Ces résultats sont sensiblement moins bons que dans les partitions précédentes, notamment en validation externe/croisée, où tous les échantillons sont prédits à tour de rôle, tandis que dans les cas précédents la validation externe ne portait que sur quelques profils, choisis pour être bien représentés pédologiquement (Cal1Val1 et Cal2Val2) ou spectralement (Cal3Val3) par les profils d'étalonnage.

Les prédictions ont été sensiblement améliorées en enlevant de la population les échantillons des profils Regina41 et Nancibo16, mal représentés spectralement par les échantillons des autres profils (cf. plus bas et chiffres accompagnant la Figure 15).

Prédiction par profil

Les prédictions ont été réalisées à l'échelle de l'échantillon, mais il est ensuite possible de les sommer à l'échelle du profil 0-60 cm, et de comparer détermination conventionnelle et prédiction VNIRS du stock de carbone sur le profil. Cette sommation à l'échelle du profil a en particulier été réalisée pour la procédure Cal4Val4 (validation croisée "leave-one-profile-out"), sur spectres centrés-réduits et dérivés (SNV155 ; Figure 15).

Dans d'autres travaux (pas encore publiés), nous avons pu observer que certaines erreurs aléatoires de prédiction à l'échelle de l'échantillon pouvaient se compenser en partie à l'échelle du profil, une sous-prédiction à un niveau de profondeur venant réduire une sur-prédiction à un autre niveau de profondeur. Mais ce n'était pas le cas ici, comme le montrent les chiffres qui accompagnent la Figure 15 : pour les prédictions par profil vs. par échantillon, on a obtenu respectivement :

SECV = 40% vs. 51% de la moyenne (et 33% vs. 46% sans 41 ni 16) mais R²cv = 0,29 vs. 0,43 (et 0,50 vs. 0,54 sans 41 ni 16) et RPDcv = 1,15 vs. 1,33 (1,34 vs. 1,44 sans 41 ni 16).

Tableau 11 - Prédiction du stock de carbone par échantillon (gC dm^{-3}) avec quatre partitions étalonnage/validation (la dernière procédure, Cal4Val4, est une validation croisée où chaque profil est prédit à partir des autres ; Moy moyenne ; SD écart type ; SEC, SECV et SEP erreur standard de calibration, de validation croisée, de prédiction ; RPD=SD/SE ; le biais est le résidu moyen).

Pré- traitement	Calibration						Validation externe				
	SEC	R ² cal	RPDcal	SECV	R ² cv	RPDcv	SEP	biais	pente	R ² val	RPDval
Cal1 (N=106, Moy et SD=12.1±7.5 g kg ⁻¹), Val1 (N=36, Moy et SD=14.9±11.2 g kg ⁻¹)											
None001	4.1	0.70	1.82	5.3	0.50	1.41	11.7	7.0	1.06	0.28	0.96
None155	3.7	0.75	2.02	5.3	0.51	1.43	11.3	7.2	0.84	0.39	1.00
None1205	3.7	0.76	2.05	5.1	0.54	1.48	10.3	6.4	0.68	0.51	1.09
SNV001	4.1	0.71	1.86	5.1	0.53	1.47	12.3	8.3	1.26	0.36	0.92
SNV155	4.5	0.64	1.67	5.6	0.44	1.34	12.1	7.2	1.22	0.24	0.93
SNV1205	3.8	0.75	2.00	5.5	0.47	1.38	10.1	5.7	0.86	0.44	1.11
D001	4.1	0.70	1.83	6.4	0.26	1.17	12.9	8.5	1.15	0.24	0.87
D155	4.0	0.72	1.88	6.3	0.30	1.20	11.8	7.6	1.02	0.33	0.95
D1205	3.8	0.75	2.00	5.9	0.38	1.28	11.6	7.9	0.81	0.43	0.97
SNVD001	3.9	0.73	1.94	5.3	0.49	1.41	14.3	9.5	1.76	0.16	0.78
SNVD155	4.4	0.66	1.72	5.6	0.44	1.34	12.5	7.8	1.29	0.24	0.90
SNVD1205	3.6	0.77	2.10	5.0	0.55	1.49	11.1	6.9	0.88	0.39	1.01
Cal2 (N=112, Moy et SD=12.7±8.6 g kg ⁻¹), Val2 (N=30, Moy et SD=12.9±8.9 g kg ⁻¹)											
None001	8.4	0.06	1.03	9.0	-0.10	0.96	7.7	-0.3	0.31	0.44	1.16
None155	4.5	0.73	1.92	8.5	0.02	1.01	6.8	-0.7	0.99	0.41	1.31
None1205	4.3	0.76	2.03	8.3	0.07	1.04	6.9	0.8	0.81	0.41	1.30
SNV001	3.5	0.83	2.44	7.7	0.20	1.12	5.5	0.9	0.72	0.68	1.64
SNV155	3.7	0.82	2.35	7.4	0.26	1.17	8.2	2.2	1.39	0.22	1.09
SNV1205	4.1	0.77	2.10	8.3	0.08	1.05	7.0	0.8	0.89	0.37	1.27
D001	4.2	0.76	2.04	7.8	0.18	1.11	8.2	2.1	1.03	0.17	1.08
D155	3.7	0.81	2.32	8.1	0.12	1.07	9.5	2.5	2.60	0.07	0.94
D1205	4.9	0.68	1.78	8.3	0.06	1.03	7.5	0.6	1.12	0.27	1.18
SNVD001	4.0	0.79	2.18	7.6	0.22	1.14	8.5	3.4	1.30	0.22	1.04
SNVD155	4.2	0.76	2.06	7.7	0.21	1.13	9.9	3.8	2.18	0.20	0.90
SNVD1205	4.4	0.74	1.97	7.3	0.28	1.19	8.6	2.8	1.54	0.19	1.03
Cal3 (N=102, Moy et SD=13.8±9.2 g kg ⁻¹), Val3 (N=40, Moy et SD=10.3±6.6 g kg ⁻¹)											
None001	8.3	0.18	1.10	8.9	0.06	1.04	8.0	-2.4	11.49	0.00	0.82
None155	3.9	0.82	2.39	8.1	0.21	1.13	9.6	-6.8	2.19	0.22	0.68
None1205	4.2	0.79	2.19	8.3	0.18	1.11	7.7	-4.4	1.91	0.28	0.85
SNV001	3.6	0.85	2.57	7.0	0.41	1.31	5.8	-2.2	1.50	0.42	1.13
SNV155	3.6	0.84	2.52	7.0	0.41	1.31	6.7	-3.6	1.63	0.38	0.98
SNV1205	3.7	0.84	2.50	6.8	0.45	1.36	7.9	-4.8	1.92	0.35	0.83
D001	4.0	0.81	2.28	7.2	0.37	1.27	4.8	0.2	1.36	0.51	1.36
D155	4.0	0.81	2.31	8.3	0.17	1.10	10.4	-7.8	2.25	0.20	0.63
D1205	4.0	0.81	2.30	8.0	0.24	1.15	10.2	-7.6	2.11	0.26	0.65
SNVD001	3.5	0.85	2.59	6.4	0.52	1.45	6.1	-1.9	1.74	0.42	1.07
SNVD155	2.8	0.91	3.26	6.3	0.53	1.47	11.2	-8.0	2.92	0.18	0.59
SNVD1205	3.6	0.85	2.58	6.0	0.57	1.53	8.1	-5.3	1.83	0.34	0.81
Cal4 (N=138, Moy et SD=12.9±8.8 g kg ⁻¹), Val4 (N=138, Moy et SD=12.9±8.8 g kg ⁻¹)											
None001	6.4	0.47	1.37	8.2	0.12	1.07	8.2	-0.8	1.58	0.12	1.07
None155	5.6	0.58	1.55	7.6	0.25	1.16	7.6	0.3	1.42	0.25	1.16
None1205	5.8	0.56	1.50	7.7	0.22	1.14	7.7	0.4	1.49	0.22	1.14
SNV001	3.5	0.84	2.53	7.1	0.34	1.24	7.1	-0.9	1.52	0.34	1.24
SNV155	3.7	0.82	2.35	6.6	0.43	1.33	6.6	0.1	1.24	0.43	1.33
SNV1205	4.0	0.79	2.18	6.6	0.42	1.32	6.6	0.2	1.26	0.42	1.32
D001	4.0	0.80	2.22	7.9	0.17	1.10	7.9	-0.4	1.63	0.17	1.10
D155	4.0	0.79	2.17	6.6	0.43	1.33	6.6	0.1	1.56	0.43	1.33
D1205	4.2	0.77	2.09	6.7	0.40	1.30	6.7	0.1	1.67	0.40	1.30
SNVD001	4.1	0.78	2.13	7.8	0.20	1.12	7.8	1.1	1.67	0.20	1.12
SNVD155	5.9	0.54	1.48	8.0	0.16	1.09	8.0	0.3	1.24	0.16	1.09
SNVD1205	6.1	0.52	1.44	8.2	0.11	1.07	8.2	0.3	1.28	0.11	1.07

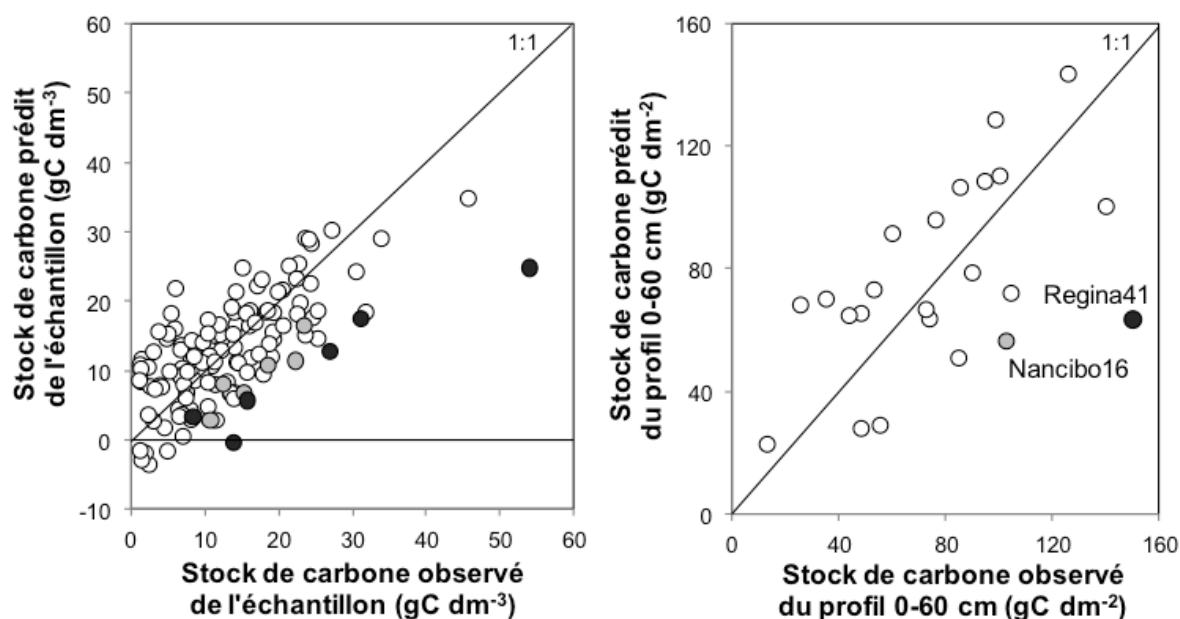


Figure 7 - Comparaisons entre valeurs observées et prédites du stock de carbone par échantillon et par profil 0-60 cm en validation croisée "leave-one-profile-out" (les échantillons d'un profil sont prédits par les échantillons des autres profils, à tour de rôle) en étalonnage dit "global" (étalonnage usuel) ; les prédictions sont réalisées sur spectres centrés-réduits et dérivés (SNV155).

Prédictions par échantillon : SECV = 6,6 gC dm⁻³ (5,5 gC dm⁻³ sans 41 ni 16)

R²cv = 0,43 (0,51 sans 41, 0,54 sans 41 ni 16)

RPDcv = 1,33 (1,37 sans 41, 1,44 sans 41 ni 16)

Prédictions par profil 0-60 cm : SECV = 30,7 gC dm⁻² (24,2 gC dm⁻² sans 41 ni 16)

R²cv = 0,29 (0,43 sans Regina41, 0,50 sans 41 ni 16)

RPDcv = 1,15 (1,26 sans 41, 1,34 sans 41 ni 16)

Étalonnage local

Dans les étalonnages présentés jusqu'ici, dits globaux, un modèle est construit avec les échantillons d'étalonnage et appliqué indistinctement aux échantillons de validation (même dans le cas de Cal4Val4 où les échantillons sont alternativement utilisés pour l'étalonnage et la validation). Dans le cas de l'étalonnage local, un échantillon de validation est prédit uniquement à partir d'échantillons potentiellement d'étalonnage qui sont ses voisins spectraux (sur la base du coefficient de corrélation entre leurs spectres). La littérature, incluant nos travaux, a monté l'intérêt de l'étalonnage local pour améliorer la précision des prédictions par NIRS, concernant en particulier les propriétés des sols (Shenk et al., 1997 ; Fernandez Pierna & Dardenne, 2008 ; Rabenarivo et al., 2013 ; Clairotte et al., 2016), surtout pour les populations hétérogènes d'effectif élevé.

On a appliqué cet étalonnage local à la procédure CalVal4 : les échantillons d'un profil ont été prédits uniquement à partir des échantillons d'autres profils qui étaient leurs voisins spectraux, à condition que ces voisins soient au moins au nombre de 10 (pas de prédiction si l'échantillon à prédire a moins de 10 voisins spectraux parmi les échantillons d'étalonnage), le seuil de voisinage étant fixé à R = 0,95 (donc si les spectres de deux échantillons sont corrélés avec R < 0,95, ils ne sont pas considérés comme voisins). L'analyse a été réalisée sur les spectres centrés-réduits et dérivés (SNV155). Mais les prédictions se sont avérées moins précises en étalonnage local qu'en étalonnage global, du fait sans doute de l'effectif réduit de la population (Figure 19) :

- pour les prédictions par échantillon, respectivement SECV = 9,4 vs. 6,6 gC dm⁻³ (et 6,6 vs. 5,5 gC dm⁻³ sans les profils 41 et 16) ; R²cv = 0,15 vs. 0,43 (et 0,36 vs. 0,54 sans 41 ni 16) ; RPDcv = 0,87 vs. 1,33 (et 0,96 vs. 1,44 sans 41 ni 16) ;
- pour les prédictions par profil, respectivement SECV = 49,7 vs. 30,7 gC dm⁻² (et 29,4 vs. 24,2 gC dm⁻² sans 41 ni 16) ; R²cv = 0,01 vs. 0,29 (et 0,33 vs. 0,50 sans 41 ni 16) ; RPDcv = 0,80 vs. 1,15 (et 1,07 vs. 1,34 sans 41 ni 16).

On note que les prédictions par étalonnage local étaient particulièrement mauvaises pour les deux profils Regina41 et Nancibo16, mal représentés spectralement par les échantillons des autres profils ; car les prédictions s'améliorent plus nettement qu'en étalonnage global quand ces deux profils ne sont plus prédits. Pourtant, au seuil de $R = 0,95$, les échantillons de ces deux profils avaient suffisamment de voisins spectraux pour que les prédictions soient possibles.

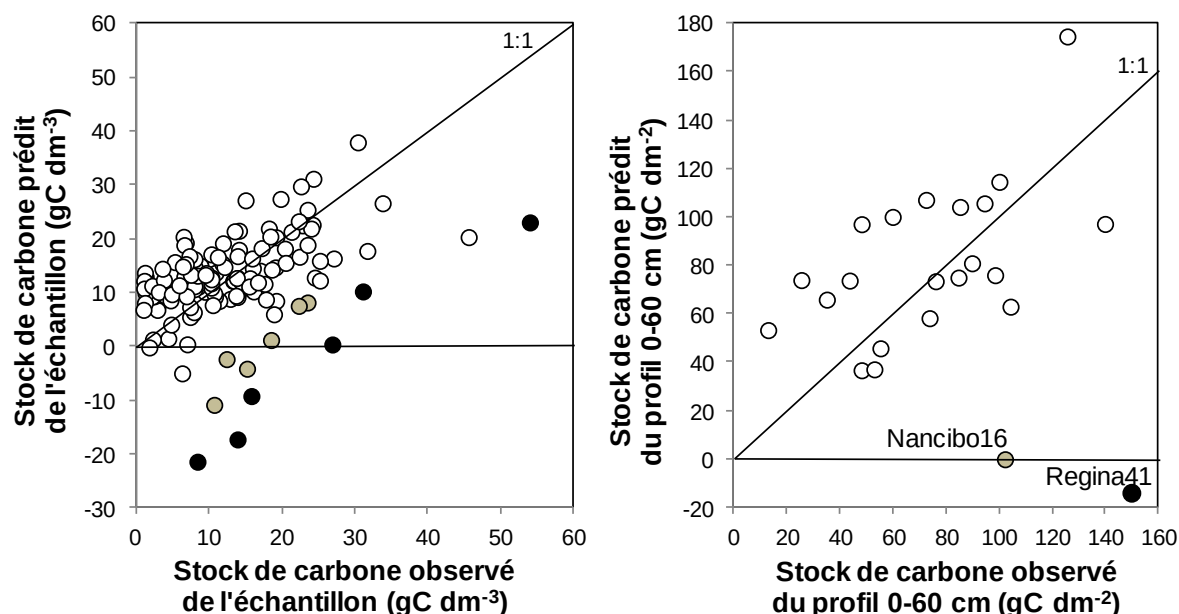


Figure 19 - Comparaisons entre valeurs observées et prédites du stock de carbone par échantillon et par profil 0-60 cm en validation croisée "leave-one-profile-out" (les échantillons de chaque profil sont prédits par les échantillons des autres profils) en étalonnage local (prédiction uniquement à partir de voisins spectraux) ; les prédictions sont réalisées sur spectres centrés-réduits et dérivés (SNV155).

Prédictions par échantillon : SECV = 9,4 gC dm⁻³ (6,6 gC dm⁻³ sans 41 ni 16)
 $R^2_{cv} = 0,15$ (0,24 sans Regina41, 0,36 sans 41 ni 16)
 RPD_{cv} = 0,87 (0,94 sans 41, 0,96 sans 41 ni 16)

Prédictions par profil 0-60 cm : SECV = 49,7 gC dm⁻² (29,4 gC dm⁻² sans 41 ni 16)
 $R^2_{cv} = 0,01$ (0,15 sans 41, 0,33 sans 41 ni 16)
 RPD_{cv} = 0,80 (0,98 sans 41, 1,07 sans 41 ni 16)

Synthèse et interprétation

Pour les quatre partitions et tous les prétraitements testés, en validation croisée ou externe, l'erreur de prédiction reste supérieure à 40% de la moyenne, R^2 n'atteint pas 0,7 et RPD n'atteint pas 1,7 dans le meilleur des cas, ce qui n'est guère satisfaisant.

En plus du stock de carbone des échantillons (gC dm⁻³), nous avons aussi prédit leur concentration (gC kg⁻¹), d'après les dosages réalisés à Montpellier sur les échantillons issus des carottes scannées sur le terrain. Nous n'insistons pas sur ces résultats car la prédiction de la concentration en carbone du sol à partir de spectres VNIR acquis au champ est déjà assez bien documentée dans la littérature (Stevens et al., 2008, Morgan et al., 2009, et nos travaux Gras et al., 2014, et Cambou et al., 2016). Pour les quatre partitions considérées (Cal1Val1 à Cal4Val4), les prédictions de la concentration en carbone sont du même ordre que celles du stock : en validation croisée ou externe, erreur ne descendant pas sous 50% de la moyenne, $R^2 \leq 0,63$, RPD $\leq 1,64$. La littérature rapporte pourtant des prédictions correctes de la concentration en carbone du sol à partir de spectres de terrain : $R^2_{cv} = 0,86$ et RPD_{cv} = 2,8 pour Gras et al. (2014) sur des échantillons provenant de six grandes parcelles de six régions contrastées de France métropolitaine ; $R^2_{val} = 0,75$ et RPD_{val} = 2,0 pour Cambou et al. (2016) sur des échantillons provenant de deux grandes parcelles agroforestières de deux régions de France.

Cela suggère que c'est la diversité notamment pédologique des échantillons de sols forestiers guyanais étudiés ici qui rend difficile la prédiction de leurs propriétés par VNIRS. Des prédictions VNIRS sont possibles sur une population pédologiquement diverse, à condition que chaque

composante de cette diversité soit représentée par un nombre suffisant d'échantillons. Manifestement ces conditions étaient très imparfaitement réunies ici, avec un total de 24 profils, dont certains ne représentant qu'eux-mêmes pédologiquement, les échantillons d'un même profil étant utilisés soit en étalonnage, soit en validation.

L'ACP réalisée sur les spectres centrés-réduits et dérivés (SNV155) des 142 échantillons montre effectivement qu'un certain nombre de profils sont mal représentés par les autres profils (Fig. 16). Dans le plan factoriel 1-2, représentant 63% de la variance totale, c'est le cas des profils Regina41, Organabo4 (profondeurs 0-10 et 10-20 cm surtout), Quesnel7 (profondeurs 20-30 à 50-60 cm surtout), Sinnamary8 (profondeurs 20-30 à 50-60 cm surtout), Nancibo5 (profondeurs 0-10 et 10-20 cm surtout) et Iracoubo39. Dans le plan factoriel 3-4, représentant encore 20% de la variance totale, c'est le cas des profils Sinnamary8 (profondeurs 20-30 à 50-60 cm surtout), Regina29 (profondeurs 0-10 et 20-30 cm surtout), 16, 7 (profondeurs 20-30 à 50-60 cm surtout), 5 et même 14. Cela représente au total une quarantaine d'échantillons mal représentés spectralement par les autres profils (soit près de 30% de la population) ; il était effectivement prévisible que sur ces échantillons, les prédictions avec des modèles construits sur les autres profils soient peu précises. Le RPDval calculé sur 6 échantillons du profil est ainsi de 0,5 pour 39 et 5, de 0,7 pour 16, etc., ce qui témoigne de mauvaises prédictions.

En résumé, la prédiction du stock de carbone sur une diversité de sols de Guyane septentrionale à partir de spectres VNIR acquis sur carottes prélevées à la tarière à main s'est avérée peu précise, du fait probablement de l'insuffisance du nombre de profils au regard de la diversité de la population de sols. Une possibilité pour améliorer les prédictions serait d'enrichir la population de validation avec des échantillons de chaque profil à prédire (méthode dite de spiking ; Guerrero et al., 2010, 2014). Ainsi, dans la procédure où les échantillons d'un profil sont prédits à partir des autres profils, on pourrait envisager d'enrichir chaque population d'étalonnage avec l'horizon 0-10 cm du profil à prédire, afin d'ajouter une information "locale" à l'étalonnage, information relativement facile à obtenir car obtenue en surface (mesurer la masse volumique est contraignant car il faut ouvrir une fosse, sauf pour les couches de sol superficiel). Il serait souhaitable également de pouvoir augmenter le nombre de sites, afin de disposer d'une population plus importante se prêtant mieux à l'étalonnage statistique des spectres VNIR.

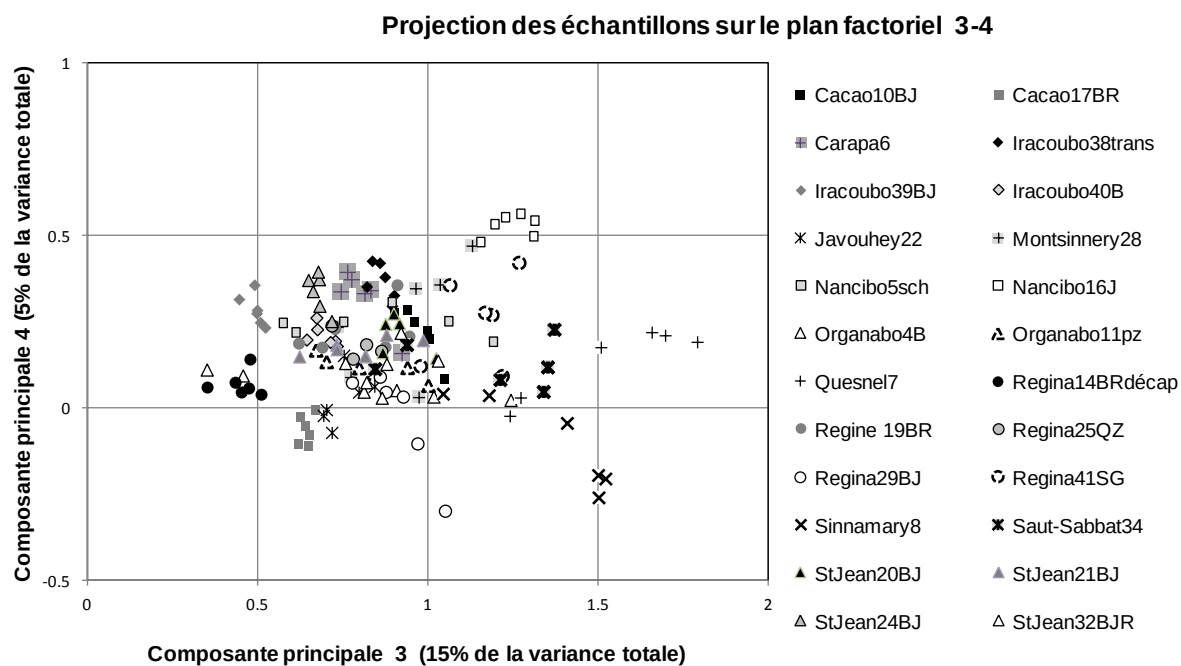
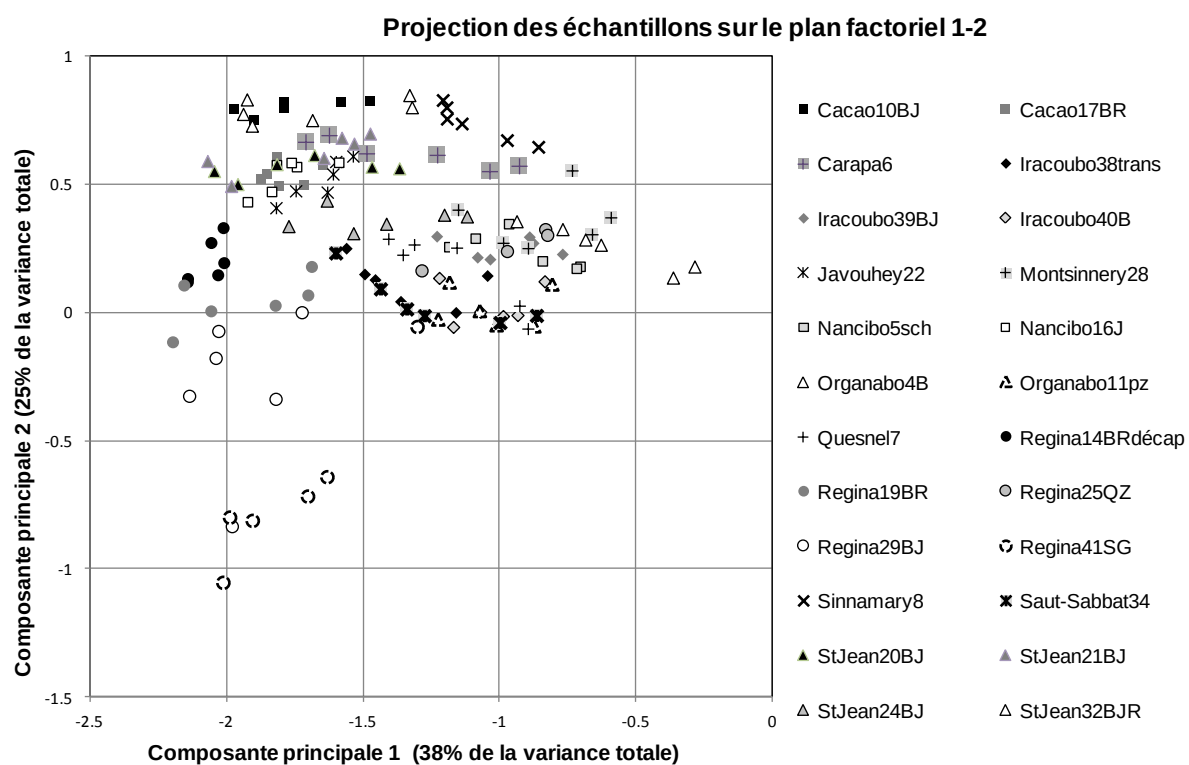


Figure 16 - Projection des échantillons sur les plans factoriels 1-2 et 3-4 de l'ACP réalisée sur les spectres centrés-réduits et dérivés (SNV155) des 142 échantillons des 24 fosses.

4. Valorisation et diffusion

Valorisation

Les premiers stades de valorisation du travail d'inventaire des stocks de carbone sont présentés au Journées d'études AFES (Rouen, juillet 2018) et au Congrès mondial de science du sol (Rio, août 2018) sous forme de communications orales :

- Courte A., Fujisaki K., Perrin A-S., Brossard M. - CarSGuy : Carbone des Sols de Guyane.
- Courte A., Jolivet C., Boulonne L., Desjardins T., Blavet D., Soler-Dominguez N., Sarrazin M., Brossard M. – Soil organic carbon stocks assessment, an emergency for environmental and agricultural policies. A case study from Amazonia (French Guiana).

Diffusion

- Les journées des sols ont été organisées par A. Courte et M. Brossard (ADEME/IRD/AFES) sur tout le territoire en janvier 2017 : trois journées, St Laurent du Maroni, Matiti, Cacao, avec la participation de deux chercheurs brésiliens (C. Carvalho & LC Balbino de l'EMBRAPA) et deux acteurs de l'ADEME (A. Bispo & T. Eglin).
- Publications en cours de rédaction : Courte et al. pour Étude et Gestion des Sols « Carbone des sols de Guyane : une première approximation » ; Courte et al., Soil organic carbon stocks assessment, uncertainty in Amazonian context.
- Journées des sols à Cayenne de 2018 avec un focus RMQS & CarSGuy (semaine du 12/11/2018).

5. Recommandations

- Imposer la mesure des stocks de carbone jusqu'à au moins 1 m de profondeur, lorsque les volumes utiles de sols le permettent lorsque des évaluations à moyen long terme sont recherchées.
- Étendre les inventaires/cartographies 1:50.000^{ème} de sols vers le sud de la Guyane en privilégiant les zones à vocation agricoles.
- Mettre en chantier la cartographie du carbone en relation avec les habitats forestiers pour mieux cerner le stock total du territoire.
- Poursuivre la mesure de stocks dans les systèmes agricoles afin d'en cerner la variabilité, le devenir des stocks dans des situations diachroniques bien repérées, et ainsi également obtenir des résultats pour incrémenter la validation des modèles de simulation à court et moyen terme.
- Ce dernier point appelle une remarque : un réseau de mesure suivi par les agriculteurs pourrait être envisagé en appui de coopératives ou tout autre structure partagée.
- Nécessité également de maintenir le site expérimental de Combi, qui arrive à 10 ans après défriche.
- Il est important de considérer les critères pédologiques dans les attributions foncières. Jusqu'à maintenant lorsque les recommandations étaient produites elles n'étaient guère ou pas suivies ; en conséquence on voit actuellement des réattributions de terrains sur des zones proscrites par les pédologues il y a 30 ans ! Les résultats sont aisément visibles : zones strictement hydromorphes, érosion de versants ...
- Nécessité de recréer une structure régionale de sauvegarde et animation de la thématique carbone en appui aux politiques publiques. En effet il est des besoins de bilan GES du territoire, et la structure GEC (Guyane Energie Climat) a été mise en extinction en 2017 par la Collectivité territoriale.

- Importance de la conservation de résidus végétaux en surface du sol lors de la défriche. En effet les travaux de recherche montrent que les stocks organiques sont sensibles à la déforestation ; les restitutions au départ permettent de limiter les problèmes érosifs et tamponnent la décade du stock du sol.
- Poursuivre la recherche méthodologique en spectroscopie de terrain pour faciliter les mesures d'inventaires de stocks.

6. Conclusion / Perspectives

Ce travail a permis d'offrir un panel de nouveaux résultats sur les stocks de carbone de la zone tropicale humide jusqu'à un mètre de profondeur. Les inventaires conduisent à préciser les stocks en particulier de l'ensemble des Ferrallitisols. Les approches cartographiques de distribution de stocks de carbone des sols offrent une assez bonne estimation du stock pour le nord de la Guyane. Le déstockage suite à la défriche, mis en évidence tant sur un site expérimental que par les simulations confirme la sensibilité des sols. Les niveaux de restitutions de carbone utilisés dans ces simulations, issus des travaux à Pointe Combi (Terres Inovia ex-CETIOM) montrent que de toutes façons les pertes de C seront sensibles, et ce quelque que soit le mode d'usage de terre suite à la déforestation. Seules des stratégies de plantes très productives peuvent remédier cette question qui devient un problème environnemental. La modélisation RothC avait été validée pour le site de Combi. Toutefois, des inventaires de stocks de situations dont l'âge du changement d'usage est bien connu devront être effectués pour mettre les simulations à l'épreuve du terrain pour les sites guyanais, et prendre en compte la diversité des modes d'usages des sols et des types de sols. Les pertes en C sont les plus rapides dans les premières années après déforestation ; 10 ans après déforestation, la médiane de diminution simulée des stocks est de 7,81 MgC ha⁻¹, soit une diminution des stocks de 16 %. Cela est dans l'ordre de grandeur de la diminution des stocks de C observée sur le site de Pointe Combi 5 années après déforestation et implantation de cultures annuelles (19 %). Les variations prédites sont néanmoins plus faibles que celles rapportées dans la littérature des milieux tropicaux humides, probablement en raison des restitutions par les cultures relativement importantes compte tenu des rendements agronomiques élevés, avec notre référentiel de Combi. A notre connaissance ce genre d'étude pour des cultures annuelles est unique en Amazonie et vient renforcer nos premiers résultats à Combi. Nous mettons toutefois en garde contre des extrapolations spatio-temporelles de nos résultats en particulier pour les cultures annuelles, compte tenu d'une part des incertitudes liées à la modification du pédoclimat qui peut influencer le devenir de stocks de COS sur le long terme, et d'autre part des restitutions en carbone probablement plus faibles dans des systèmes moins optimisés, ou avec des rotations à un seul cycle par an.

Les simulations sont conduites pour la couche 0-0,3 m, à ce stade l'intégration de couches plus profondes ne peut être conduite sans envisager du travail approfondi dans les outils de modélisation (modification du code et intégration plus fine du pédoclimat par ex.).

Les bilans de déforestation en contribution de gaz à effet de serre (GES) ne pourront être uniquement comptabilisés au seuls brulis de la biomasse (ressource pour usines biomasses par ex.) et devront comptabiliser la fourchette de pertes de carbone des sols que nous proposons.

Références bibliographiques

- ADEME - Délégation Régionale Guyane, 2009. Développement de la biomasse énergie et développement agricole en Guyane : Impact de la valorisation des déchets de bois sur le bilan gaz à effet de serre du territoire. <http://www.ademe-guyane.fr/>. Février 2012
- Arrouays D., Deslais W., Badeau V., 2001. The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. *Soil and Use Management*, 17, 7-11.
- 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 (8), 2677-2688.
- Balbino L.C., Bruand A., Brossard M., Grimaldi M., Hajnos M., Guimarães M.F. 2002 – Changes in porosity and microaggregation in clayey Ferralsols of the Brazilian Cerrado. *Eur. J. Soil Sc.* 53, 219-230.
- Barnes R.J., Dhanoa M.S., Lister S.J., 1989. Standard normal variate transformation and detrending of near-infrared diffuse reflectance spectra. *Applied Spectroscopy* 43: 772-777.
- Beaudou A., Le Martret H., MIRURAM/VALSOL : un système d'information et une base de données pour représenter les sols tropicaux et leurs environnements. *Etude et Gestion des Sols*, 2004, 11 (3), p. 271-284. ISSN 1252-5861
- Blancaneaux P., Thiais J-L. (collab.), Laplanche G. (collab.), Rostan J-J. (collab.), Bergrave S-J. (collab.). Podzols et sols ferrallitiques dans le Nord-Ouest de la Guyane française. *Cahiers ORSTOM.Série Pédologie*, 1973, 11 (2), 121-153. ISSN 0029-7259
- Boulet R., Lucas Y., Fritsch E., Paquet H. Géochimie des paysages : le rôle des couvertures pédologiques. In : *Sédimentologie et géochimie de la surface : à la mémoire de Georges Millot*. s.l. : s.n., 1993, p. 55-76.
- Bréchet L (2009) Contribution à l'étude de la variabilité spatiale des composantes du bilan de carbone d'un sol de forêt tropicale humide (Paracou, Guyane française). Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré de Nancy.
- Cambou A., Cardinael R., Kouakoua E., Villeneuve M., Durand C., Barthès B.G., 2016. Prediction of soil organic carbon stock using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in the field. *Geoderma* 261: 151-159.
- Carbon Project, 2012. <http://www.globalcarbonproject.org>
- CEROM, Comptes Économiques Rapides pour l'Outre-Mer.Guyane , 2008. Guyane : un développement sous contraintes INSEE/IEDOM/AFD Guyane.
- Chang C.W., Laird D.A., Mausbach M.J., Hurburgh C.R.J., 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy – Principal components regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of America Journal* 65: 480-490.
- Chauvel A., Vital A.R.T., Lucas Y., Desjardins T., Franken W.R., Luizao F.J., Araguas L.A., Rozanski K., Bedmar A.P., 1992. O papel das raízes no ciclo hidrológico da floresta amazônica. In: *Anais do sétimo congresso brasileiro de Meteorologia*. Sao Paulo : Université de Sao Paulo, 1992, p. 298-302. *Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 7., 1992/09/28; 1992/10/02, Sao Paulo.
- Clairiotte M., Grinand C., Kouakoua E., Thébaud A., Saby N.P.A., Bernoux M., Barthès B.G., 2016. National calibration of soil organic carbon concentration using diffuse infrared reflectance spectroscopy. *Geoderma* 276: 41-52.
- Coleman, K., Jenkinson, D.S., 1999. ROTHC-26.3. Model Turnover Carbon Soils Herts Rothamsted Res. Harpenden Herts. UK.
- Couteron, P., et al., 2003. Drawing ecological insights from a management-oriented forest inventory in French Guiana. *Forest Ecology and Management*, 172(1): 89-108.
- De Vos B., Lettens S., Muys B., Deckers J.A., 2007. Walkley-Black analysis of forest soil carbon: recovery, limitations and uncertainty. *Soil Use and Management*, 23, 221-229.
- Dupuits E., Jameux M., Brossard M. 2015 - Rapport Final de Convention MAAF – DGPAAT. Programme régional Inventaire Gestion et Conservation des Sols. Référentiel Régional Pédologique : ROM – Guadeloupe, Guyane, Île de la Réunion. Synthèses morphopédologiques. 171p.
- Dunn B.W., Beecher H.G., Batten G.D., Ciavarella S., 2002. The potential of near infrared reflectance spectroscopy for soil analysis – a case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 42: 607-614.
- FAO, 2002. TERRASTAST, Digital Soil Map of the world and derived soil properties. Land and water development division, Roma, Italy.
- FAO, 2011. Situation des forêts du monde -9ème édition du rapport biennal.
- Fanin N, Hättenschwiler S, Barantal S, Schimann H, Fromin N (2011) Does variability in litter quality determine soil microbial respiration in an Amazonian rainforest ? *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 1014-1022.
- Fernandez Pierna J.A., Dardenne P., 2008. Soil parameter quantification by NIRS as a chemometric challenge at 'Chimiometrie 2006', *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 91: 94-98.
- Ferry, B., 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(1): 106-116.
- Fujisaki K., 2014. Devenir des stocks de carbone organique des sols après déforestation et mise en culture : une analyse diachronique en contexte amazonien. Montpellier : SupAgro, 2014, 237 p. multigr. Th. Ecosystèmes et Sci. Agron., Supagro, 2014/11/27.

- Fujisaki K., Perrin A. S., Desjardins T., Bernoux M., Balbino L. C., Brossard M. From forest to cropland and pasture systems : a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. *Global Change Biology*, 2015, 21 (7), p. 2773-2786. ISSN 1354-1013
- Fujisaki K., Perrin A.S., Garric B., Balesdent J., Brossard M., 2017. Soil organic carbon changes after deforestation and agrosystem establishment in Amazonia : an assessment by diachronic approach. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 245, 63-73. doi:10.1016/j.agee.2017.05.011
- Galy-Lacaux, C., R. Delmas, et al. (1997). Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana. *Global Biogeochemical Cycles* 11(4): 471-483.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muñiz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I., Vargas, R. (eds), 2014. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg, 176 pp
- Geladi P., McDougall D., Martens H., 1985. Linearization and scatter correction for near infrared reflectance spectra of meat. *Applied Spectroscopy* 39: 491–500.
- Granville Jean-Jacques de. Monocotyledons and Pteridophytes indicators of environmental constraints in the tropical vegetation. *Candollea*, 1984, 39 (1), p. 265-269. ISSN 0373-2967
- Gras J.P., Barthès B.G., Mahaut B., Trupin S., 2014. Best practices for obtaining and processing field visible and near infrared (VNIR) spectra of topsoils. *Geoderma* 214–215: 126–134
- Grassi, G., S. Monni, et al., 2008. Applying the conservativeness principle to REDD to deal with the uncertainties of the estimates. *Environmental Research Letters* 3(3): 12.
- Grimaldi C., Grimaldi M., Vauclin M. The effect of the chemical composition of a ferrallitic soil on neutron probe calibration. *Soil Technology*, 1994, (7), p. 233-247. ISSN 0933-3630
- Guerrero C., Zornoza R., Gómez I., Mataix-Beneyto J. 2010. Spiking of NIR regional models using samples from target sites: Effect of model size on prediction accuracy. *Geoderma* 158: 66–77.
- Guerrero C., Stenberg B., Wetterlind J., Viscarra Rossel R.A., Maestre F.T., Mouazen A.M., Zornoza R., Ruiz-Sinoga J.D., Kuang B., 2014. Assessment of soil organic carbon at local scale with spiked NIR calibrations: effects of selection and extra-weighting on the spiking subset. *European Journal of Soil Science* 65: 248–263.
- Guitet, S, Blanc, L., Chave, J., & Gomis, A. 2006. Expertise sur les references dendrométriques nécessaires au renseignement de l'inventaire national de gaz a effet de serre pour la foret guyanaise
- Guitet S., Brunaux O., Granville J.J. de, Gonzalez Sophie, Richard-Hansen C., Sabatier Daniel (collab.). Catalogue des habitats forestiers de Guyane. Cayenne : ONF, 2015, 120 p. ISBN 978-2-84207-384-8
- Guitet S., Sabatier Daniel, Brunaux O., Coueron Pierre, Denis T., Freycon V., Gonzalez Sophie, Herault B., Jaouen G., Molino Jean-François, Pélissier Raphaël, Richard-Hansen C., Vincent Grégoire. Disturbance regimes drive the diversity of regional floristic pools across Guianan rainforest landscapes. *Scientific Reports - Nature*, 2018, 8, p. art. 3872 [12 p.]. ISSN 2045-2322
- Grinand C., Rajaonarivo A., Bernoux M., Pajot V., Brossard M., Razafimbelo T., Albrecht A., Le Martret H. Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, 2009, 16 (1), p. 23-33.
- Henry M., Belem M., d'Annunzio R., Bernoux M. 2015 Les stocks de carbone des sols d'Afrique de l'Ouest. In : Brossard M., Razafimbelo-Andriamifidy T., Bernoux M., Sall S.N., Razakamanarivo R.H., Gallali T., Guibert H., Hien E., Amadji G., Kone A.W. Badiane Y., Balarabe O., Konare H. Carbone des sols d'Afrique. Les stocks, les pratiques de gestions. Une réflexion portée par le Réseau CaSA. Novembre 2015. 220 pp. CaSA, <http://reseau-carbone-sol-afrique.org/>
- Henault C, Bizouard F, Laville P, Gabrielle B, Nicoullaud B, Germon JC, Cellier P (2005) Predicting in situ soil N2O emission using NOE algorithm and soil database. *GLOBAL CHANGE BIOLOGY* 11 115-127
- Inventaire Forestier National (2009) a - Rapport d'activité 2009.
- Inventaire Forestier National (2009) b - Changements d'occupation et d'utilisation des terres dans les départements d'Outre-Mer, l'IF n°23, 3ème trimestre 2009.
- Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.* 10, 423–436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- Leprun J-C., Misset M., Viala A-L.(collab.), Le Martret H., Wegnez F., Cheaib N., Beaudou A., Le Rouget B. Cartographie agro-pédologique des sols guyanais à partir des documents existants et intégration dans un SIG : rapport général de fin de convention. Montpellier (FRA), Cayenne : IRD, EPAG, 2001, 150 p. multigr.
- Lévêque A. Les sols ferrallitiques de Guyane française. Paris : ORSTOM, 1967, 168 p. (Mémoires ORSTOM ; 3).
- Mark H.L., Tunnell D., 1985. Qualitative near-infrared reflectance analysis. *Analytical Chemistry* 58: 379–384.
- Martens H., Jensen S.A., Geladi P., 1983. Multivariate linearity transformation for near infrared reflectance spectrometry. In: *Proceedings of the Nordic Symposium on Applied Statistics*. Stokkand Forlag Publishers, Stavanger, Norvège, pp. 205–234.
- Mathieu C., Pieltain F., 1998. Analyse Physique des Sols – Méthodes Choiesies. Editions Lavoisier, Paris.
- Morgan C.L.S., Waiser T.H., Brown D.J., Hallmark C.T., 2009. Simulated in situ characterization of soil organic and inorganic carbon with visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 151: 249–256.

- Morneau, F., 2007. Effet d'un gradient d'engorgement hydrique sur la structure et la dynamique d'une forêt tropicale humide (Paracou, Guyane française). Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts : Nancy (France). 256 pp.
- ONF/CIRAD- Etude technico-économique sur les possibilités de la biomasse pour l'alimentation électrique de la Guyane – Rapport d'étude - version provisoire de juin 2007. Disponible sur le site <http://www.ademe-guyane.fr/>
- Paget, D., 1999. Étude de la diversité spatiale des écosystèmes forestiers guyanais : réexamen méthodologique et application. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts: Nancy (France). 155 pp.
- Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644.
- Perrin A.-S., Fujisaki K., Petitjean C., Sarrazin M., Godet M., Garric B., Horth J.-C., Balbino L.C., Silveira Filho A., Machado P.L.O.A., Brossard M. 2014. Conversion of forest to agriculture in Amazonia with the chop-and-mulch method: does it improve the soil carbon stock ? *Agriculture, Ecosystem and Environment* 184, 101-114.
- Perrin, A.S., Petitjean C., Garric B., Legall C., Fujisaki K., Brossard M., Hénault C. 2016. A fire-free experiment of forest conversion to grassland and cropland in French Guiana : pluriannual greenhouse gases fluxes, nitrogen & carbon losses in water. 5Th international Ecosummit : Ecological sustainability, engineering change. 29/08-02/09/2016 Montpellier, France. Poster. DOI: 10.13140/RG.2.2.33334.91208.
- Petitjean Caroline, 2013. Mesures in situ et simulations des flux de N₂O émis par les sols : Cas du changement d'usage des terres en Guyane : déforestation par la méthode 'chop-and-mulch' suivie de la mise en valeur agricole. Université Antilles-Guyane, soutenue le 17/06/2013 à l'INRA d'Orléans.
- Petitjean C., Hénault C., Perrin A.-S., Pontet C., Metay A., Bernoux M., Jehanno T., Viard A., Roggy J.-C., 2015. Soil N₂O emissions in French Guiana after the conversion of tropical forest to agriculture with the chop-and-mulch method. *Agric. Ecosyst. Environ.* 208, 64–74.
- Pinta F., 2005. Bois énergie en Guyane : production d'électricité et de froid industriel. *Bois et Forêts des Tropiques* 284 (2).
- Programme Régional pour la Maîtrise de l'Energie PRME (2011) Identification des conditions pour une valorisation énergétique de la biomasse issue de l'installation des agriculteurs en Guyane.
- Programme Régional pour la Maîtrise de l'Energie PRME (2012) Identification des conditions pour une valorisation énergétique de la biomasse issue de l'installation des agriculteurs en Guyane (Guyane Consult). Présentation du 7 février 2012, Guyane.
- Puig H., Riéra B. and Lescure J. P. (1990). "Phytomasse et productivité." *Bois et Forêts des Tropiques* 220 : 25 - 32.
- Rabenarivo M., Chapuis-Lardy L., Brunet D., Chotte J.-L., Rabeharisoa L., Barthès B.G., 2013. Comparing near and mid-infrared reflectance spectroscopy for determining properties of Malagasy soils, using global or LOCAL calibration. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 21: 495–509.
- Ramifiharivo N., Brossard M., Razakamanarivo H. Challenges in establishing digital maps of soil organic carbon in Madagascar. *Pedometron*, 2016, (39), p. 26-31.
- Ramifiharivo N., Brossard M., Grinand C., Andriamananjara A., Razafimbelo T., Rasolohery A., Razafimahatratra H., Seyler Frédérique, Razafindrabe F., Razakamanarivo H. Mapping soil organic carbon on a national scale : towards an improved and updated map of Madagascar. In : Arrouays D. (ed.), Lagacherie P. (ed.). *Digital soil mapping across the globe. Geoderma Regional*, 2017, 8, p. 29-38. ISSN 2352-0094
- Rapport final – version provisoire (Guyane Consult), 209pp.
- Reeves III J.B., McCarty G.W., Mimmo T., 2002. The potential of diffuse reflectance spectroscopy for the determination of carbon inventories in soils. *Environmental Pollution* 116: S277-S284.
- Robain H., 1992. Étude de la transformation latérale d'un horizon jaune compact en un horizon poreux (système-sol de la crique Balate, Guyane française). In : Wackerman Jean-Marie (ed.). *Organisation et fonctionnement des altérites et des sols*. Bondy : ORSTOM, 1992, p. 137-155. (Colloques et Séminaires). ISSN 0767-2896 *Organisation et Fonctionnement des Altérites et des Sols : Séminaire*, 1990/02/05-09, Bondy.
- Sabatier, D., et al., 1997. The influence of soil cover organization on the floristic and structural heterogeneity of a Guianan rain forest. *Plant Ecology*, 131(1): 81-108.
- SAR, 2016. Schéma d'Aménagement Régional de la Guyane, Collectivité territoriale de Guyane, 481 pp.
- Sarrailh J.M. (1980) L'écosystème forestier guyanais Etude écologique de son évolution sous l'effet des transformations en vue de sa mise en valeur. *Bois et Forêts des Tropiques* n°189.
- Sarrailh J.M. (1984) Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais. Opération ECEREX : résumé des premiers résultats. *Bois et Forêt des Tropiques* n°206.
- Sarrailh J.M. (1987) L'Opération ECEREX Etudes sur la mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais après déboisement. Le point sur les recherches en cours. *Bois et Forêts des Tropiques* n°219, spéciale Guyane.
- Shenk J.S., Westerhaus M.O., Berghazi P., 1997. Investigation of a LOCAL calibration procedure for near infrared instruments. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 5: 223–232.
- Shirato Y, Jomura M, Wagai R, Kondo M, Tanabe K, Uchida M (2013) Deviations between observed and RothC-simulated $\Delta^{14}\text{C}$ values despite improved IOM initialization. *European Journal of Soil Science*, 64, 576–585

- Stenberg B., Viscarra Rossel R.A., Mouazen A.M., Wetterlind J., 2010. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Advances in Agronomy* 107: 63-215.
- Stevens A., van Wesemael B., Bartholomeus H., Rosillon D., Tychon B., Ben-Dor E., 2008. Laboratory, field and airborne spectroscopy for monitoring organic carbon content in agricultural soils. *Geoderma* 144: 395–404.
- Tandy J.C., Grimaldi M., Grimaldi C., Tessier D., 1990. Mineralogical and textural changes in French Guyana oxisols and their relation with microaggregation. In : Douglas L.A. (ed.). *Soil micromorphology : a basic and applied science*. Amsterdam : Elsevier, 1990, p. 191-198. (Developments in Soil Science ; 19). ISBN 0-444-88302-9 International Working Meeting of Soil Micromorphology, 8., 1988/07, San Antonio
- Turenne J-F., 1977. Modes d'humification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises. Paris : ORSTOM, 1977, 173 p. (Mémoires ORSTOM ; 84). ISBN 2-7099-0447-0 Th. : Sci. Nat. : Nancy : no AO11403 : 1975/06/20.
- Veillon Luc. Sols ferrallitiques et podzols en Guyane septentrionale : relations entre systèmes de transformations pédologiques et évolution historique d'un milieu tropical humide et forestier. Paris : ORSTOM, 1991, 266 p. (Travaux et Documents Microédités ; 76). ISBN 2-7099-1066-7 Th. Sci. de la Terre, Paris 6, 1990/07/10.
- Vivier M., Vissac B., Matheron G. (1995) L'élevage bovin en Guyane : une innovation majeure dans le milieu équatorial de plaine 1975-1990. Montpellier CIRAD, 302 pp.

Index des tableaux et figures

Tableaux

Tableau 1 - Statistiques descriptives des propriétés des sols (extraction Valsol - Guyane)	11
Tableau 2 – Exemple du stock de carbone d'un grand paysage pédo-morphologique GP-1-4.....	15
Tableau 3 - Données d'entrée et de sortie du modèle RothC. Les apports de carbone incluent les restitutions de litière aérienne et racinaire ainsi que la rhizodéposition. Le ratio DPM/RPM est défini par défaut selon le type d'écosystème étudié : il est de 0,25 pour les forêts (tropicales ou tempérées), 1,44 pour les cultures et les prairies fertilisées, et 0,67 pour les jachères ou prairies abandonnées (Coleman & Jenkinson, 1999).....	17
Tableau 4 - Entrées de carbone utilisées pour simuler la dynamique des stocks de C du sol après déforestation et mise en culture. Les entrées souterraines de C ont été estimées à partir des entrées aériennes de C, à l'aide d'équations allométriques (Fujisaki, 2014).	17
Tableau 5 - Calendrier des observations et interventions réalisées entre août 2015 et janvier 2016	20
Tableau 6 - Quantités de biomasse fraîche et sèche exportées (g m^{-2}) de tous les échantillons prélevés (durant ce projet) selon l'historique des parcelles.....	21
Tableau 7 - Moyennes et écart types des quantités de biomasse aérienne sèche (g m^{-2}) exportées (durant ce projet) selon l'historique des parcelles	21
Tableau 8 - Biomasses végétales exportées ou restituées au sol entre T0 et T8. Les moyennes sont suivies des écarts-types (les valeurs en gras correspondent aux biomasses après T5, non publiées).	22
Tableau 9 - Données statistiques générales des Stocks de carbone des sols (MgC ha^{-1}) de l'inventaire (n=37 sites) CarSGuy, couches 0 à 1 m.	29
Tableau 10 - Données statistiques générales des Stocks de carbone des sols (MgC ha^{-1}) de l'inventaire (n=32 sites) RMQS, couches 0 à 1 m.	29
Tableau 11 - Prédiction du stock de carbone par échantillon (gC dm^{-3}) avec quatre partitions étalonnage/validation (la dernière procédure, Cal4Val4, est une validation croisée où chaque profil est prédit à partir des autres ; Moy moyenne ; SD écart type ; SEC, SECV et SEP erreur standard de calibration, de validation croisée, de prédiction ; RPD=SD/SE ; le biais est le résidu moyen).	49

Figures

Figure 1 - Température du sol (couche 0-0,1m), humidité volumique du sol (couche 0-0,2m) et pluviométrie enregistrée sur le site de Combi (moyenne 2011-2013, données CETIOM – Terres Inovia) (Fujisaki, 2014; Fujisaki et al., 2017)	8
---	---

Figure 2 – Carte de localisation des sites de prélèvements avec stocks de carbone de la campagne du projet CarSGuy, des campagnes RMQS Guyane et des données des inventaires pédologiques sauvegardées dans la base de données Valsol Guyane.	9
Figure 3 – Schéma représentant la règle de proportionnalité utilisée entre les unités cartographiques d'associations de sols et la typologie des sols	14
Figure 4 - Schéma représentant la règle de proportionnalité utilisée entre les unités cartographiques morpho-pédologiques et les unités de sols	15
Figure 5 - Matrice de corrélation teneur en argile, stock de carbone initial, stock de carbone en fin de simulation de la couche 0-0,3 m des sites CarSGuy et RMQS et de leurs données pluviométriques.	39
Figure 6 - Simulation à moyen terme des stocks de carbone organique du sol dans l'agrosystème prairial pour la couche 0-30 cm, à partir des données de restitution en C mesurées chaque année.	45
Figure 7 - Comparaisons entre valeurs observées et prédites du stock de carbone par échantillon et par profil 0-60 cm en validation croisée "leave-one-profile-out" (les échantillons d'un profil sont prédits par les échantillons des autres profils, à tour de rôle) en étalonnage dit "global" (étalonnage usuel) ; les prédictions sont réalisées sur spectres centrés-réduits et dérivés (SNV155).....	50

Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFD	Agence française pour le développement
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
Cirad	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
Cnrs	Centre national de la recherche scientifique
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
GEC	Guyane énergie climat
Gis Sol	Groupement d'intérêt scientifique Sol
IFN	Inventaire forestier national, ancien établissement public fusionné en 2012 dans l'Institut national de l'information géographique et forestière
Inra	Institut national de recherche agronomique
Insee	Institut national de la statistique et des études économiques
IRD	Institut de recherche pour le développement, ex-Orstom
ONF	Office National des Forêts
PAS	Périmètres d'attributions simplifiés
PER	Plan énergétique régional (Guyane)
RMQS	Réseau de Mesures de la Qualité des Sols
Terres Inovia	Institut technique des professionnels de la filière des huiles et protéines végétales (oléagineuses et protéagineuses) et de la filière chanvre Interchanvre, ex-Cetiom
ZAAC	Zones d'aménagements agricoles concertées

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



STOCKS DE CARBONE DES SOLS DE GUYANE : MESURE ET DISTRIBUTION

Résumé Les données collectées ici permettent d'approcher la spatialisation des contenus de C des sols même si la variabilité de stocks restent forte.

Les données collectées à partir de 236 sites permettent de quantifier et spatialiser les stocks (0-0,3/0-0,5/0-1 m). Ainsi la couche de 1m contient 81,74 Mg ha⁻¹, avec une grande variabilité (42-246 Mg ha⁻¹). La modélisation permet de constater que la mise en culture induit de fortes baisses des stocks, 16 % du stock initial à courte terme après défriche. L'essai expérimental du site de Combi, montre que les stocks ont tendance à croître avec une prairie de fauche intensive. Enfin, l'étude méthodologique de mesure du stock par spectroscopie-spectrométrie sur le terrain n'a pas été concluante, car testée sur un nombre d'échantillons insuffisant au vu de la diversité pédologique.

Essentiel à retenir

Une étude originale, unique pour le milieu amazonien à cette échelle : des stocks de carbone, de la spatialisation des stocks, des simulations de devenir de stocks après défriche. Des estimations basées sur des campagnes de terrain et la valorisation de bases de données.

ADEME

Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

www.ademe.fr





STOCKS DE CARBONE DES SOLS DE GUYANE : MESURE ET DISTRIBUTION

CarSGuy

Rapport final
Cartes et annexes



En partenariat avec :





JUIL.
2018

STOCKS DE CARBONE DES SOLS DE GUYANE : MESURE ET DISTRIBUTION

CarSGuy

Rapport final
Cartes et annexes

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

En partenariat avec :



REMERCIEMENTS

Pierre Courtiade (ADEME)
Thomas Eglin (ADEME)
Claudy Jolivet (INRA)

CITATION DE CE RAPPORT

Michel Brossard, Bernard Barthès, Anne-Sophie Perrin, Amandine Courte, Kenji Fujisaki, Ernest Kouakoua, Aurélie Cambou, Patricia Moulin, Eric Beaucher, Max Sarrazin.
2018. Stocks de Carbone des sols de Guyane : mesure et distribution.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

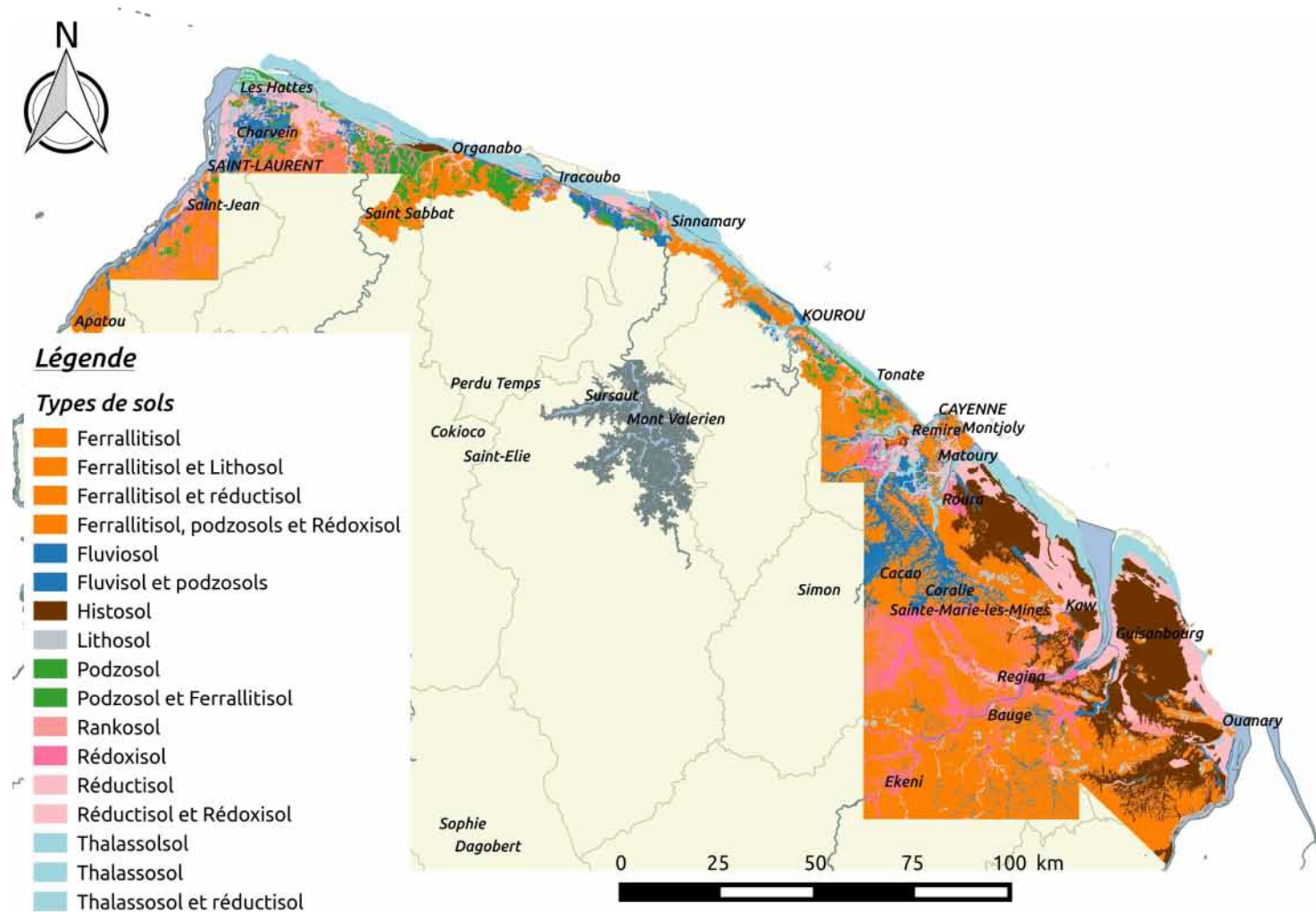
Numéro de contrat : 1560C0011

Étude réalisée par Michel Brossard, Amandine Courte, Bernard Barthès, Kenji Fujisaki, Max Sarrazin, Éric Beaucher, Patricia Moulin (IRD), Anne-Sophie Perrin (Terres Inovia) pour ce projet cofinancé par l'ADEME

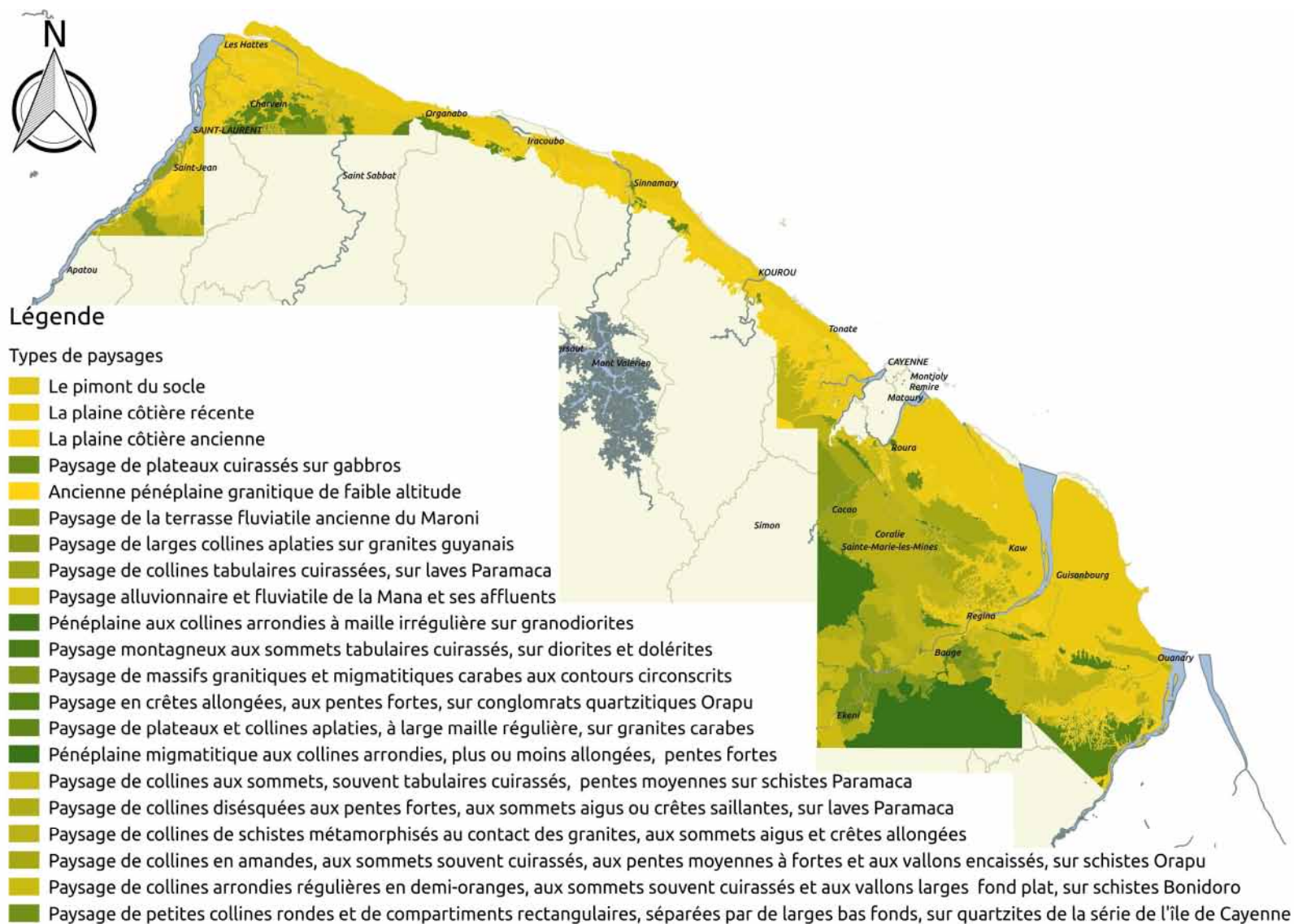
Projet de recherche coordonné par : Brossard Michel
Appel à projet de recherche : REACTIF2

Coordination technique - ADEME : BISPO Antonio & EGLIN
Thomas, Ingénieurs "Sol et Environnement"
Direction/Service : Direction Productions et Energies Durables -
Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie

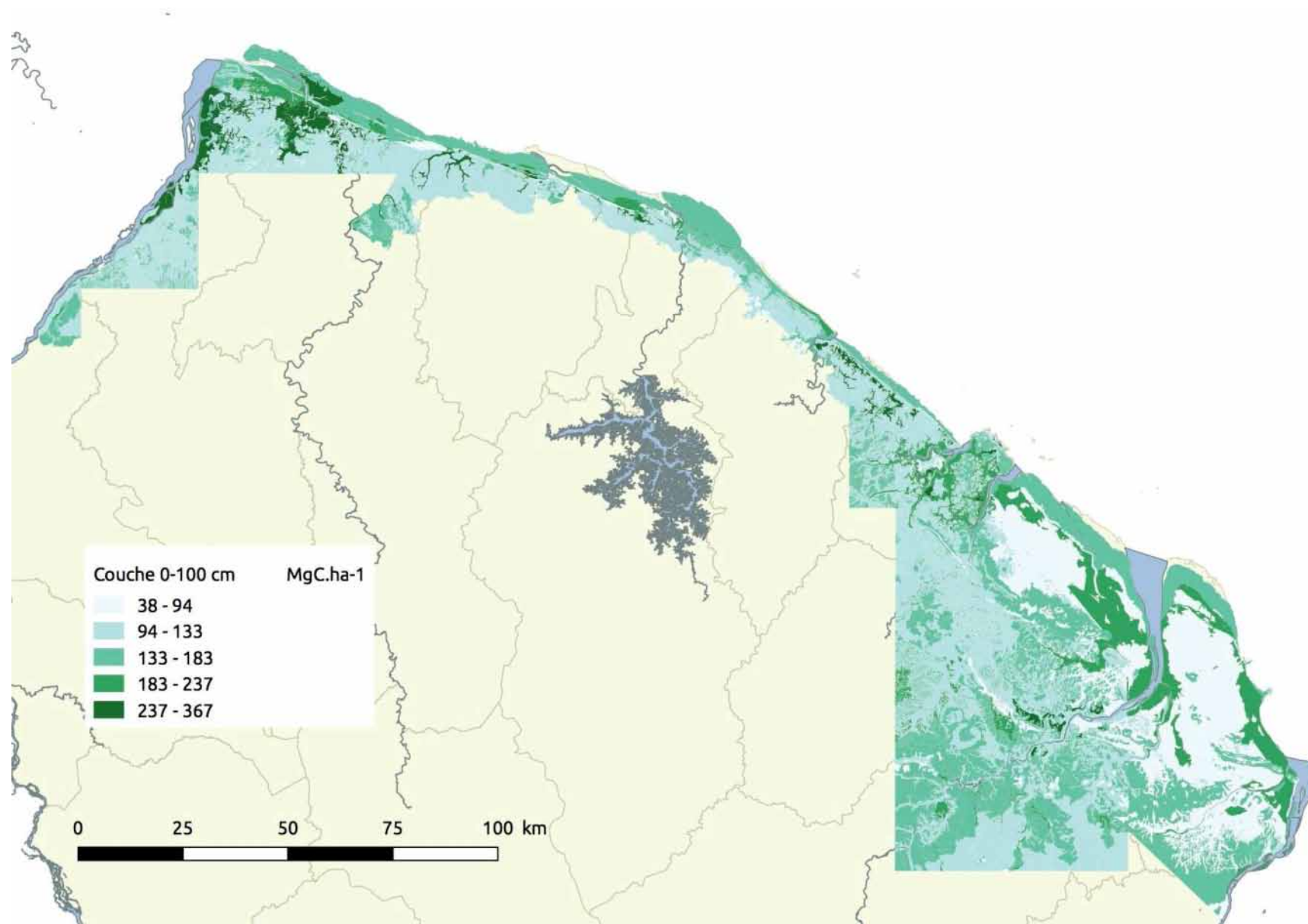
Carte 1 – Pédologie : Unités cartographiques du nord de la Guyane



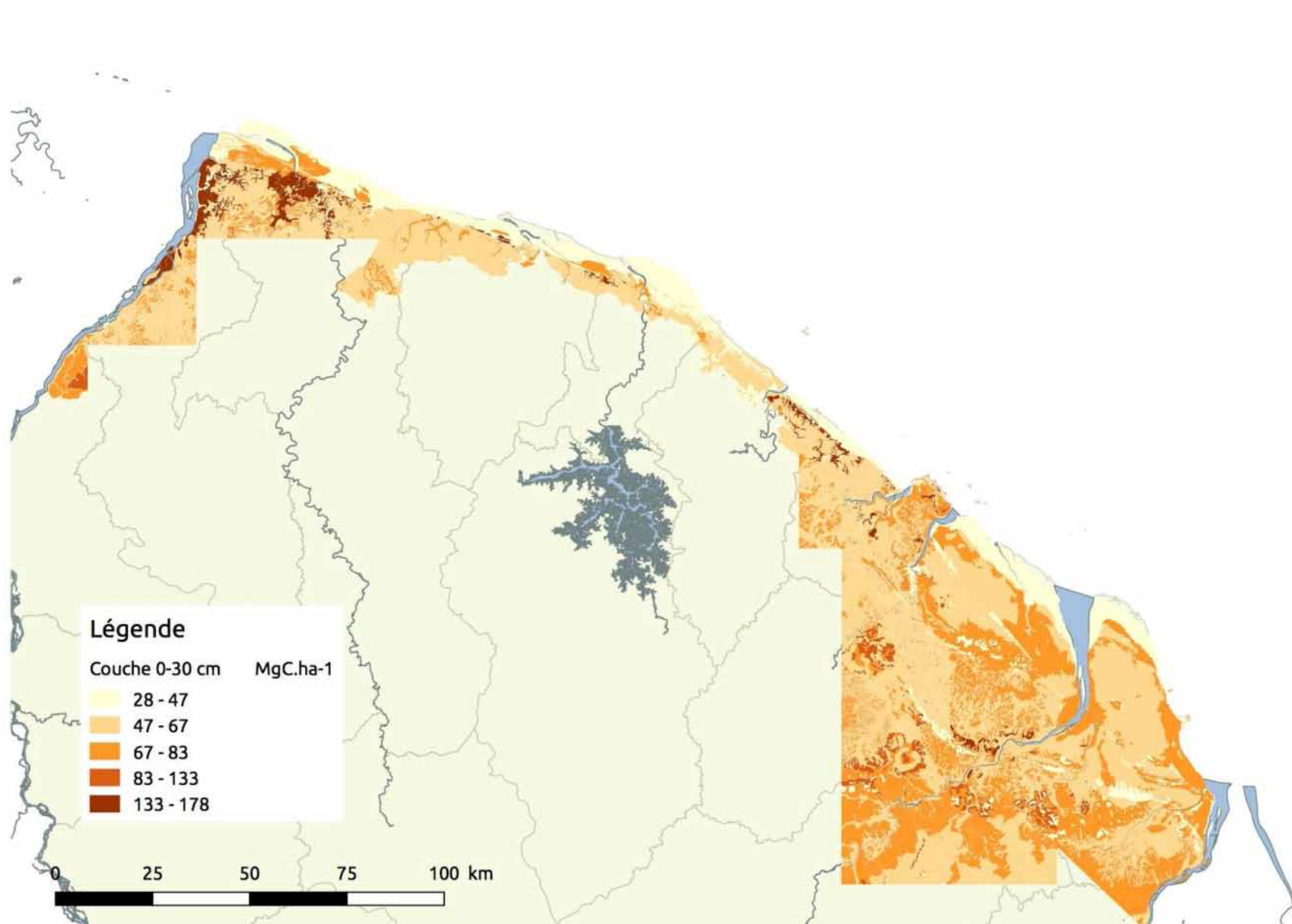
Carte 2 – Paysages morpho-pédologiques : unités cartographiques du nord de la Guyane



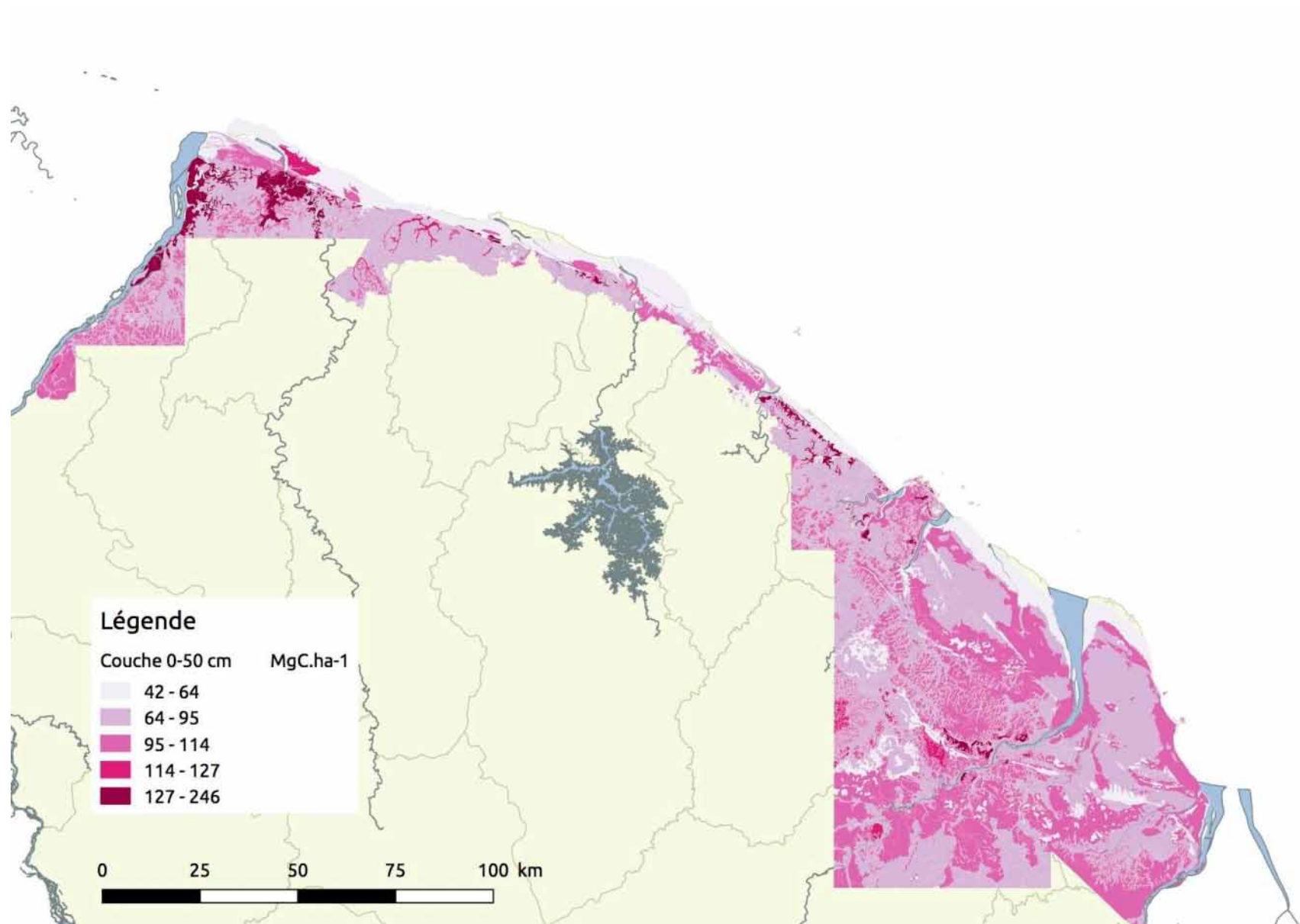
Carte 3 - Stocks de carbone de la couche 0-1 m des sols du nord de la Guyane



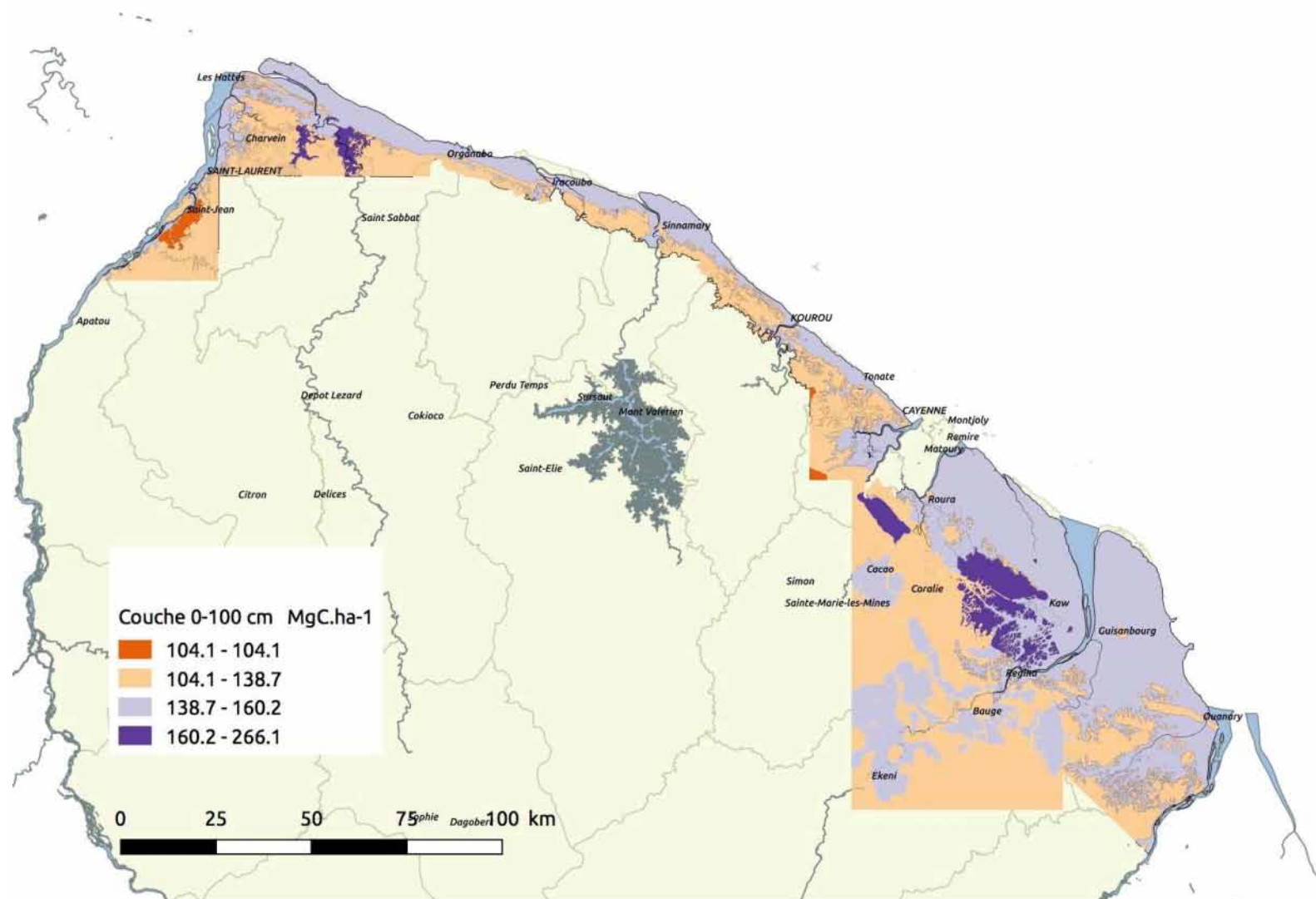
Carte 4 - Stocks de carbone de la couche 0-0,3 m des sols du nord de la Guyane



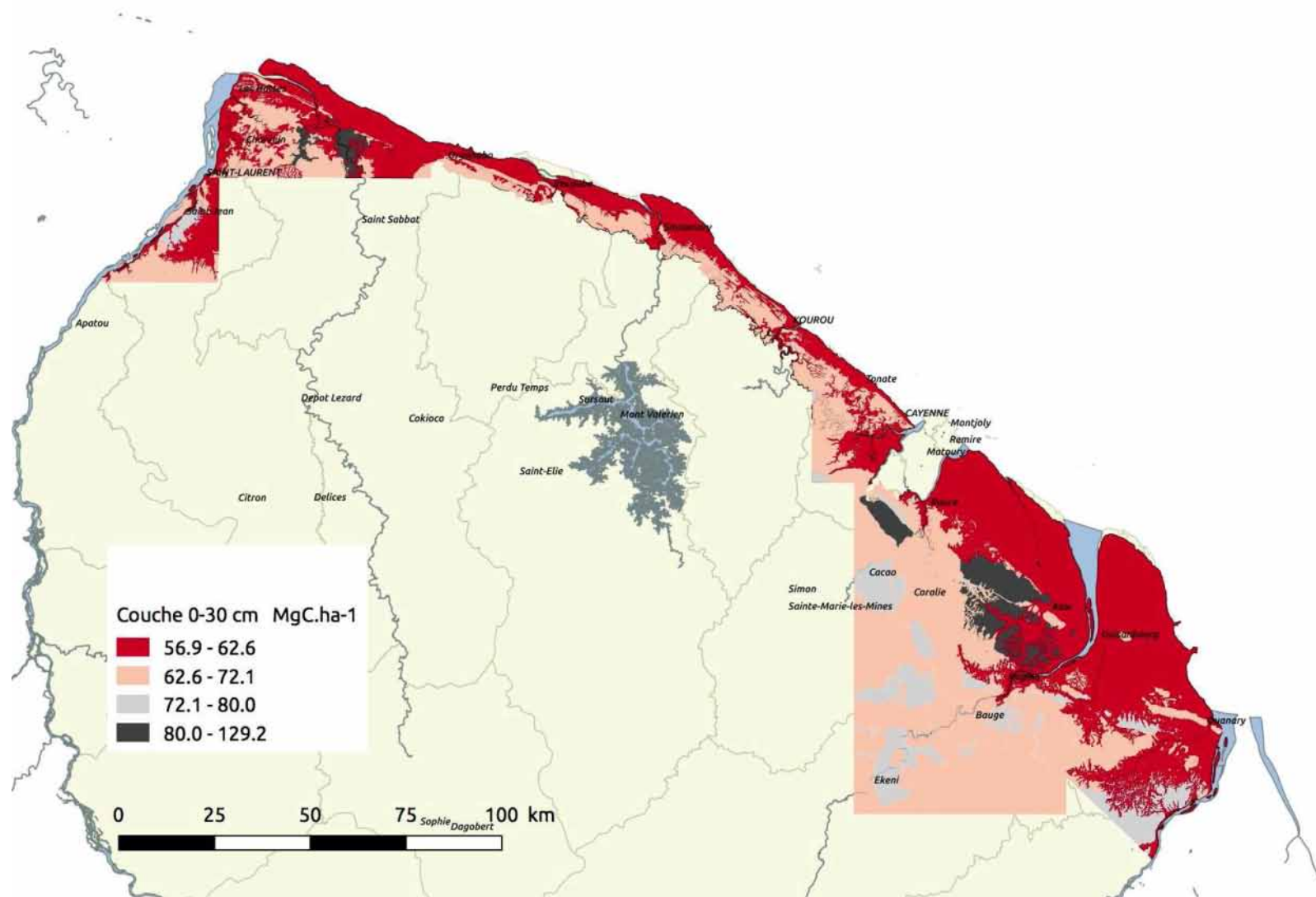
Carte 5 - Stocks de carbone de la couche 0-0,5 m des sols du nord de la Guyane



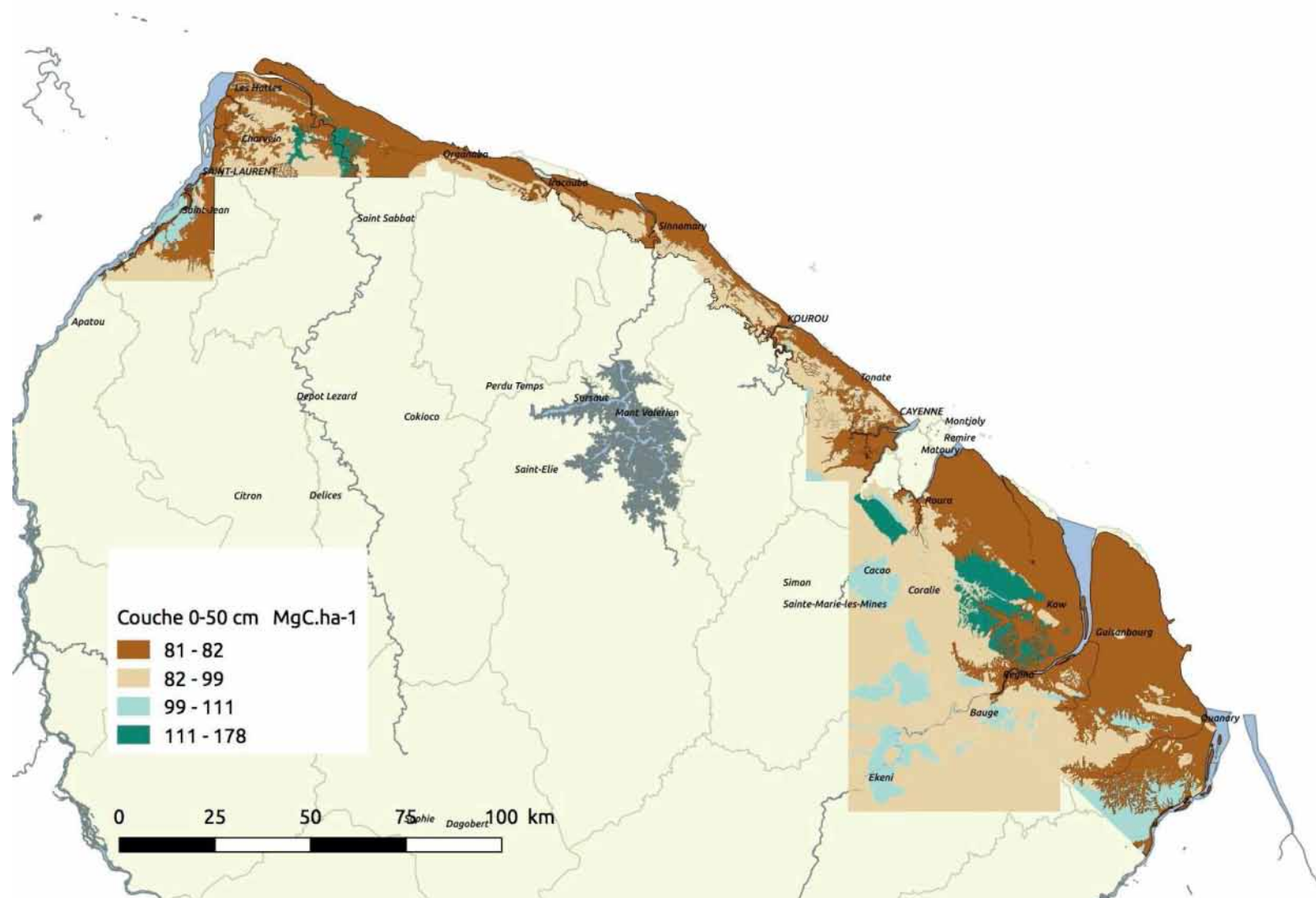
Carte 6 - Stocks de carbone de la couche 0-1 m des paysages morpho-pédologiques du nord de la Guyane



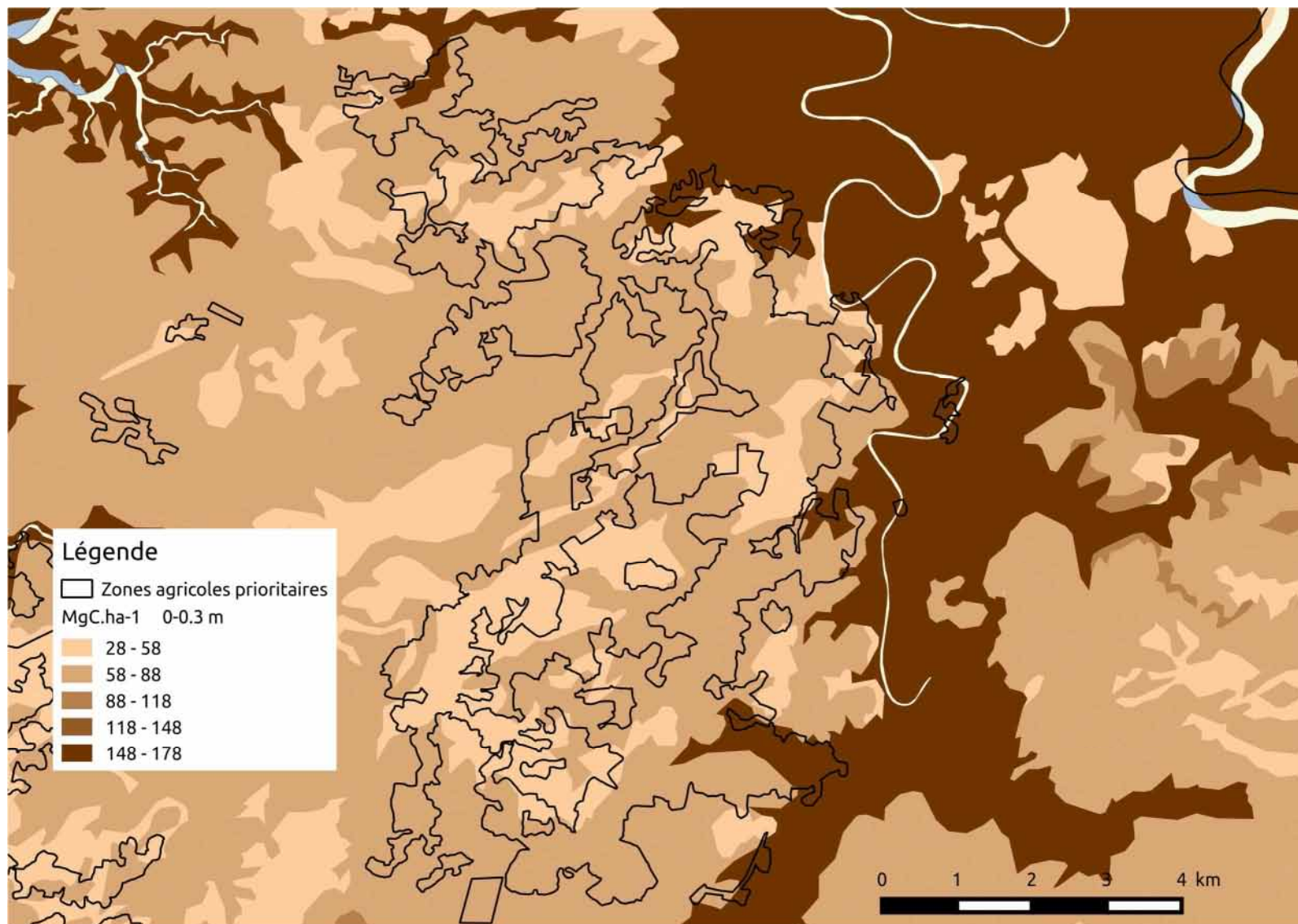
Carte 7 - Stocks de carbone de la couche 0-0,3 m des paysages morpho-pédologiques du nord de la Guyane



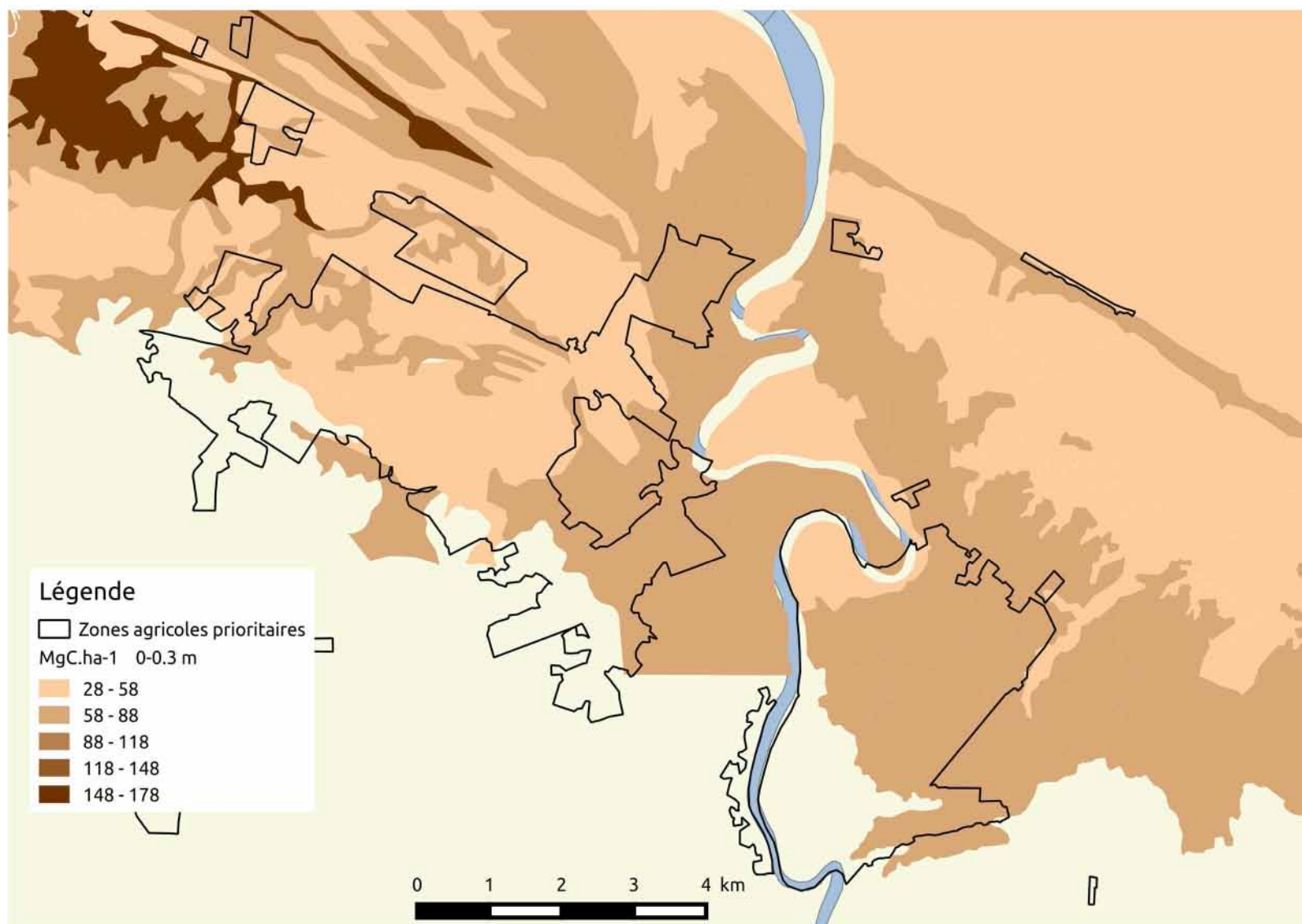
Carte 8 - Stocks de carbone de la couche 0-0,5 m des paysages morpho-pédologiques du nord de la Guyane



Carte 9 – Carte de la zone de Charvein



Carte 10 – Zone de Sinnamary

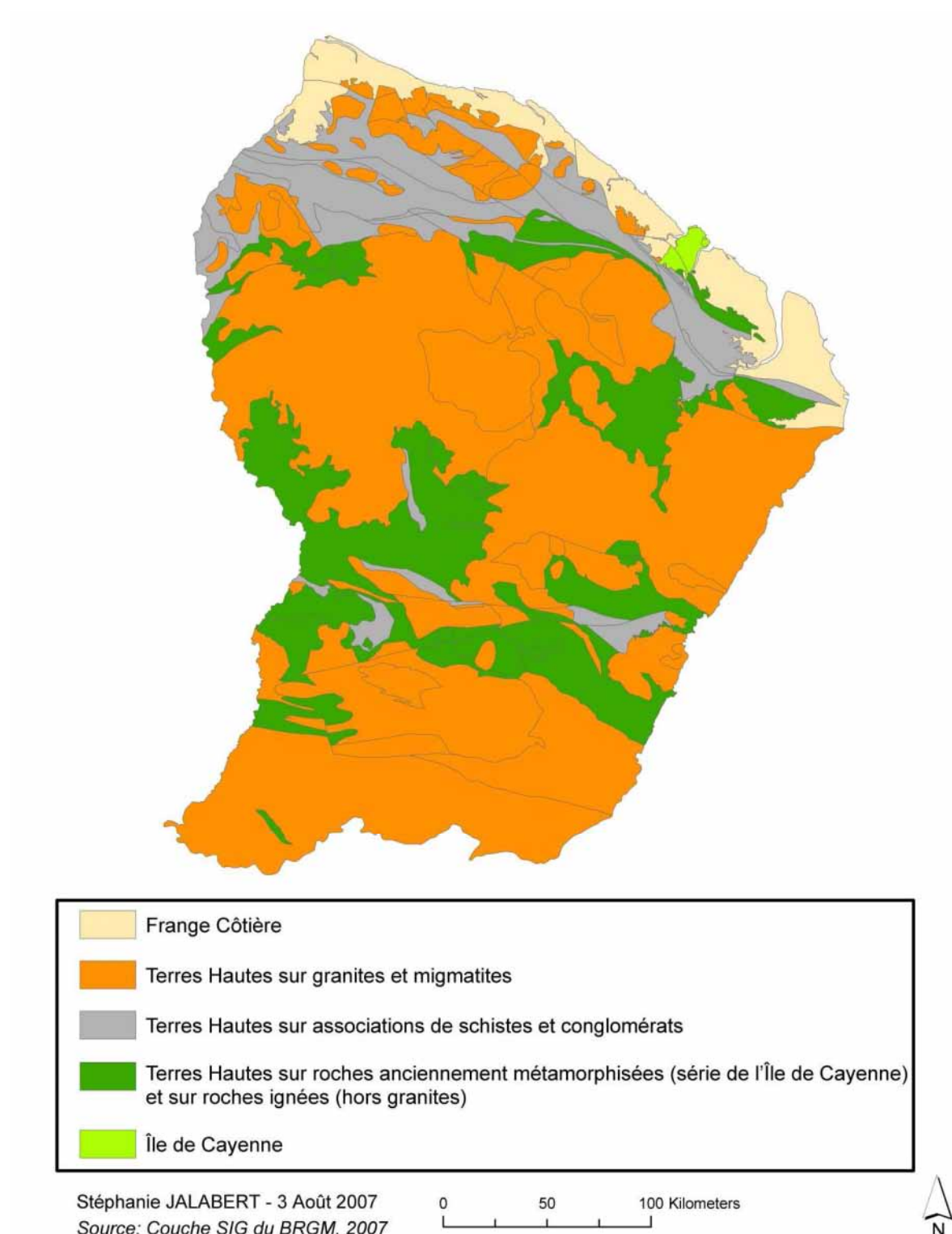


Annexes

Annexe 1- Descriptif résumé des sites inventoriés des inventaires CarSGuy.

ID_SITE	Classe sol	Ordre	Famille	Couvert végétal	texture terrain	Stock MgC.ha-1	0-0,3 m	0-1 m
2	Sol podzolisé et podzologique	Gleys profonds	sur série détritique de base	Forêt secondaire	S	29,79	74,35	
4	Sol podzolisé et podzologique	Modal	sur série détritique de base	Savane	S	12,27	25,33	
5	Sol hydromorphe peu humifère	Pseudogley de surface	sur série granitique	Forêt ancienne	S	33,21	102,3	
6	Sol peu évolué non climatique d'apport alluvial	Pseudogley de profondeur	sur alluvions fluvio-marines	Forêt secondaire	S	58,83	123,13	
7	Sol podzolisé et podzologique	Modal	sur série détritique de base	Ancien verger	S	27,26	57,82	
8	Sol peu évolué non climatique d'apport alluvial	Hydromorphe	sur cordon sableux de la plaine côtière	Forêt ancienne	S	194,56	375,92	
10	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B lessive	sur série granitique	Forêt ancienne	AS	116,92	218,18	
11	Sol hydromorphe organique	Modal	sur série détritique de base	Ancien abattis en jachère	S	97,75	220,22	
12	Sol hydromorphe organique	Tourbe et gley	sur alluvions fluvio-marines	Forêt ancienne	A	48,4	64,64	
13	Sol hydromorphe peu humifère	Gleys profonds	sur alluvions fluvio-marines argileuses	Très ancienne plantation de cacao	A	45,41	84,97	
14	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B remanié gravillonnaire	sur Paramaca	Forêt ancienne	Alo	32,69	64,92	
16	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B avec hydromorphie temporaire	sur série granitique	Forêt ancienne	A	103,51	218,1	
17	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B typique	sur Paramaca	Ancien abattis en jachère	Alo	71,89	166,02	
18	Sol hydromorphe organique	Tourbe et gley	sur alluvions fluviales argilo sableuses	Forêt ancienne	A	53,77	61,87	
19	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B remanié gravillonnaire	sur Bonidoro	Jeune plantation de Parépou	Alo	89,39	207,18	
20	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B rajeuni gravillonnaire	sur cuirasse et série granitique	Ancien abattis en jachère	AS	72,08	130,89	
21	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B remanié gravillonnaire	sur cuirasse et série granitique	Forêt secondaire	AS	50,1	11,34	
22	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B remanié gravillonnaire	sur cuirasse et série granitique	Forêt ancienne	AS	57,65	135,05	
24	Sol ferrallitique	Modal		Forêt ancienne	A	108,83	213,9	
25	Sol peu évolué non climatique d'érosion lithique	Modal	sur Orapu	Forêt ancienne	S	28,41	80,87	
28	Sol podzolisé et podzologique	Meuble	sur série de Coswine	Forêt ancienne	S	39,35	106,57	
29	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B remanié gravillonnaire	sur cuirasse et Orapu	Forêt ancienne	Alo	76,89	226,61	
30	Sol peu évolué non climatique d'apport alluvial	Gleys de surface	sur alluvions fluvio-marines	Forêt ancienne	Alo	27,97	43,95	
32	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B	sur cuirasse et série granitique	Forêt ancienne	Sa	79,9	131,27	
33	Sol podzolisé et podzologique	Modal	sur série détritique de base	Savane	S	17,98	28,33	
34	Sol hydromorphe peu humifère	Meuble	sur série détritique de base	Forêt secondaire avec de vieux manguiers	AS	32,34	100,37	
35	Sol hydromorphe peu humifère	Pseudogley	sur série détritique de base	Forêt ancienne	AS	68,67	114,71	
36	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B remanié	sur cuirasse et série granitique	Forêt ancienne	S	56,68	99,55	
38	Sol peu évolué non climatique d'apport alluvial	Pseudogley	sur cordon littoral sableux de la plaine côtière récente	Forêt secondaire, ancien abattis	AS	44,66	97,77	
39	Sol peu évolué non climatique d'apport alluvial	Pseudogley	sur cordon littoral sableux de la plaine côtière récente	Abattis	S	33,87	81,24	
40	Sol peu évolué non climatique d'apport alluvial	Pseudogley	sur cordon littoral sableux de la plaine côtière récente	Forêt ancienne	S	43,15	96,48	
41	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B remanié gravillonnaire	sur cuirasse Bonidoro/Orapu	Forêt ancienne	Alo	54,96	111,3	
42	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B remanié	sur cuirasse et série granitique	Jardin	AS	78,56	177,02	
43	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B typiques		Forêt secondaire	A	102,12	182,63	
50	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B modal	sur cuirasse et série granitique	Forêt ancienne	Alo	42,46	153,38	
54	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B rajeuni	sur cuirasse et série granitique	Forêt ancienne	A	37,78	116,41	
56	Sol ferrallitique	Fortement désaturé en B remanié gravillonnaire en surface	sur cuirasse et série granitique	Forêt ancienne	A	50,98	249,52	

Annexe 2 - Les grand paysages (GP) morphopédologiques de la Guyane



Annexe 3 - Grands paysages du nord de la Guyane utilisés dans la spatialisation des stocks de carbone

