

Dynamique du carbone dans les sols de prairies issues de la déforestation de la forêt amazonienne : étude d'une chronoséquence en Guyane française

BLANFORT V. (1), PONCHANT L. (1), DEZECACHE C. (1), STAHL C. (1), FREYCON V. (2), PICON-COCHARD C. (3), HUGUENIN J. (4), BLANC L. (5), FONTAINE S. (3)

(1) CIRAD UMR SELMET/ECOFOG, BP 701, 97387 Kourou Cedex, Guyane française

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

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

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

(5) CIRAD UR BSEF/ EMBRAPA Amazonia Oriental Caixa Postal, 48 - Belem, Para - Brésil

RESUME

La déforestation pour la mise en place de prairies constitue une perturbation majeure et brutale en zone tropicale avec des enjeux importants sur les impacts et services environnementaux liés aux écosystèmes herbagers. C'est le cas en Guyane française et plus généralement en Amazonie où le développement de l'élevage doit se raisonner dans le cadre de la protection du patrimoine forestier et des mesures actuelles d'atténuation de GES (gaz à effet de serre). L'étude analyse la dynamique temporelle du carbone (C) dans les sols d'une chronoséquence composée de 25 prairies âgées de 6 mois à 41 ans issues de la déforestation et de 6 sites de forêt témoins sur des sols ferrallitiques en Guyane. L'analyse isotopique du C ($\delta^{13}\text{C}$) a été utilisée pour déterminer l'origine du C des sols des prairies (issu de la forêt ou des graminées de la prairie). Une vingtaine d'année après leur mise en place, les prairies stockent autant de C que les sols forestiers d'origine (de 72 à 148 t C/ha, 100 t en moyenne), valeurs dépassés par certaines prairies de plus de 30 ans avec des valeurs maximales comprises entre 140 et 203 t C/ha. Les mesures isotopiques montrent que le C forestier est progressivement remplacé par le C issu des prairies au cours du temps. La caractérisation du C par son degré de dégradation dans le sol montre que le C est essentiellement stocké sous forme récalcitrante.

Study of carbon dynamics in grassland soils derived from the deforestation of the Amazonian forest: chronosequence study in French Guyana

BLANFORT V.(1), PONCHANT L. (1), FREYCON V. (2), PICON-COCHARD C. (3), HUGUENIN J. (4), , BLANC L (5) ; FONTAINE S. (3)

(1) CIRAD UMR SELMET, BP 701, 97387 Kourou Cedex , French Guyana

SUMMARY

The deforestation of tropical Amazonian forest in order to create cattle pastures has a great impact on the soil C stocks and on soil function as a C sink. This study presents and analyses the Carbon (C) temporal dynamics of soils in a chronosequence made of 17 pastures from 6 months to 41 years of age and 5 forest sites established on ferrallitic soils in French Guyana. These results show a net increasing trend of pasture soil C stocks around 20 years after deforestation. The 30 year old pastures have soil C stocks higher than the forest (130 to 141 t C/ha in pastures and 80 to 112 t C/ha in forests). The results of isotopic analysis of C ($\delta^{13}\text{C}$) used to identify the soil C origin (C derived from pasture grasses or C derived from the forest) gives rise to the effect of some deforestation practices. Indeed, the losses of soils with C derived from the forest are lower in pastures where the stumps were not dug out but gradually burned with the trunks during the years following deforestation. The qualification of C using its decomposition level in the soil shows that C is essentially stored as recalcitrant C in forest and pasture soils.

INTRODUCTION

Le stockage de C et la fertilité du sol apparaissent comme des processus synergiques favorables à la mise en place de systèmes agricoles aptes à assurer de façon durable leur fonction classique de production et celle plus récente de fournir des services écosystémiques. Le développement de l'élevage en Amazonie illustre parfaitement ces nouveaux défis car il doit se raisonner dans le cadre de la protection du patrimoine forestier et des mesures d'atténuation des GES (Blanfort *et al.*, 2011). La déforestation pour la mise en place de prairies constitue un cas de perturbation majeure et brutale en zone tropicale. Ce changement radical d'usage de la terre impacte durablement la production de services écosystémiques, notamment ceux liés au cycle du C.

C'est le cas en Amazonie et en Guyane où les prairies proviennent d'une transformation complète du milieu forestier en cultures fourragères d'espèces exotiques. Les recherches

menées depuis les années 90 aboutissent à des résultats divergents au niveau de la dynamique du C du sol sous prairie, surtout dans les 20 années suivant la déforestation (Cerri *et al.*, 2003). Au-delà de plusieurs décennies, la littérature suggère une tendance générale d'élévation des stocks en C du sol sous prairie, du fait de l'augmentation du C dérivé des graminées de la prairie (de Moraes *et al.*, 2002, Neill *et al.*, 1996). Faute d'être réellement interprétée, cette variabilité est attribuée à la nature des sols et à l'histoire des prairies. En Guyane, « le contexte » de prairies peu ou pas dégradées (propices au maintien des espèces fourragères et à la fertilité des sols) pourrait être favorable à l'accumulation de C dans le sol sur le long terme. En effet, le bilan de nutriments à l'échelle de ces prairies devrait être positif avec des entrées plus importantes que les sorties, favorisant l'activité microbienne de décomposition des matières organiques (MO) fraîches et donc l'accumulation de C récalcitrant dans le sol (Fontaine *et al.*, 2007).

L'objectif principal de ce travail consiste à étudier la dynamique temporelle du C après déforestation et mise en place de prairies pâturées. Les stocks de carbone des sols sous forêt et sous prairie (sur 1 m de profondeur) seront estimés le long d'une chronoséquence. Conjointement, l'étude cherche à expliquer les dynamiques du C observées sous prairies en caractérisant ce C par ses origines (C résiduel issu de la forêt ou C dérivé de la prairie) et son degré d'évolution-dégradation dans le sol dans les différents compartiments de la MO du sol).

Notre étude vise à déterminer la capacité des prairies amazoniennes à compenser une part de la perte de C provoquée par la déforestation en séquestrant du C de façon durable dans leur sol.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. LES SITES D'ETUDE

Notre étude concerne le littoral guyanais, mince bande de terre concentrant la quasi-totalité de la population du département et des zones agricoles dont l'élevage (32% de la SAU). Le reste du territoire (92%) est couvert d'un massif continu de forêt tropicale (8 Millions d'ha qui représentent 15% du territoire national). Le climat est de type tropical humide, avec une température moyenne annuelle de 26,5°. On observe un gradient de précipitations le long de la bande côtière, du Sud-est vers le Nord-ouest (4000 à 2000 mm) et une forte variabilité saisonnière avec des périodes d'engorgement des sols (mai-juin) et des périodes d'importantes sécheresses (août-novembre). La Guyane appartient à un grand ensemble géologique appelé bouclier du plateau des Guyanes à l'origine de sols assez similaires de la classe des sols ferralitiques fortement désaturés en bases (Boulet *et al.*, 1979). Les sols présents sur nos sites d'étude ont des textures moyennes plutôt sablo-argileuse.

Les systèmes d'élevage à majorité bovins sont plutôt de type semi-extensif (chargement moyen d'environ 1 vache/ha) sur prairies implantées avec une faible utilisation d'intrants. La filière bovine (zébu, taurin, buffle, majoritairement bœufs et génisses de plus de 30 mois) est quasi exclusivement consacrée à la production de viande avec des éleveurs naisseurs sur systèmes herbagers où la graminée *Brachiaria humidicola* constitue l'espèce fourragère dominante.

1.2. UNE APPROCHE SYNCHRONIQUE PAR CHRONOSEQUENCE

L'objectif d'une chronoséquence est de comparer à un même moment des systèmes de même nature mais d'âges différents. Nous avons opté pour un grand nombre de sites indépendants afin d'intégrer au mieux l'échelle du territoire et de décrire précisément l'évolution temporelle du C du sol. La Guyane offre de nombreux sites de prairies avec des âges et des pratiques de mise en place des prairies contrastés (type de déforestation en tableau 1, T: tronçonneuse, B: Bulldozer, C: lame coupante). Les sols ferralitiques de notre zone d'étude présentent des caractéristiques générales proches (pH acides entre 4 et 5.5, faible fertilité chimique teneur en bases échangeables très faible) mais sont aussi sujets à une variabilité locale (tableau 1) notamment liés aux différents substrats d'origine, des schistes et quartzites (S: série de Bonidoros et de Paramaca), des granites (G: granites et migmatites caraïbes), des dépôts marins et fluviomarins (M: série de Démerara et de Coswine).

Nous avons estimé les stocks en C des sols le long d'une chronoséquence composée de 25 prairies âgées de 6 mois à 41 ans issues de déforestation et de 6 sites de forêt témoins. Les prélèvements de sol ont été effectués sur une profondeur de 1 m (plus profond que la majorité des études existante) pour une meilleure prise en compte de l'épaisseur importante des sols ferralitiques. Huit carottes ont été prélevées pour chaque prairie sur 2 transects parallèles de 30 m de longueur et séparés de 10 m. Nous avons distingué

3 horizons : 0-20 cm, 20-50 cm et 50-100 cm. La végétation herbacée aérienne a également été prélevée avant chaque carottage.

Tableau 1 : Liste des sites et de leurs caractéristiques. Les sites de forêts témoins sont codés avec un F final, les prairies avec leur date de mise en place.

Sites	Substrat	Déforestation	Déssouçage
BeF,PaR	S		
DoF	G		
RiF,MoF	M		
CaF	G		
Cam1982, Cah1982	G	-	-
Ar2008, Ar2001, Ara1976, Arb1976	S	T	Non
Be3-1978, Be5-1978, Be1978, 2002	S	T	Non
Po2010, Bu2009, Gi2007	S	T	Oui
Bu2005, 2010	S	B	Oui
Do1992, 93,96, 2000, 2010	G	T	Non
Po1985, Po1987	S	C	Oui
Po1979, Po1982	S	T	Oui
Ri1970	M	B	Oui

1.3. ANALYSES ET TRAITEMENTS

Sur chaque échantillon composite de terre, les 3 compartiments du sol ont été séparés : terre fine ($\phi < 2\text{mm}$, matières organiques particulaires (MOP $< 200\mu\text{m}$) et racines sur lesquelles sont analysées les teneurs en C et en N (azote). Des analyses chimiques et granulométriques ont été réalisées sur chaque échantillon composite de sol. La teneur en C de terre fine rapporté à la densité apparente permet de calculer un stock de C pour chaque horizon afin d'obtenir un stock de C par hectare sur 1m de profondeur.

Bien que les sites d'étude aient été sélectionnés afin d'obtenir un ensemble homogène sur sol ferralitique, la densité de terre et le taux d'argile variaient entre sites et biomes étudiés avec des conséquences sur les stocks de C calculés (résultats non montrés). Par exemple, le tassement par les animaux augmentait la densité de terre et le stock de C calculé sous prairies. Afin de rendre les sites étudiés comparables entre eux, les stocks brutes de C ont été standardisés (stocks corrigés) sur une même masse de terre et une même teneur en argile pour tous les sites.

L'origine du C du sol des prairies (C issu de la forêt ou C dérivé des graminées de la prairie), est déterminée en mesurant la composition isotopique du C du sol. Ce fractionnement isotopique (Deleens, 1976) plus ou moins important (le cycle en C3 est plus discriminant vis-à-vis du ^{13}C que le cycle en C4) aboutit à une signature isotopique différente pour le C stocké par les arbres des forêts primaires étudiées ($\delta^{13}\text{C} \sim -27\text{‰}$) et par les graminées tropicales en C4 issues de la prairie ayant remplacées la forêt ($\delta^{13}\text{C} \sim -11\text{‰}$). Un système de deux équations permet d'obtenir le stock de C à priori issu de la forêt et celui nouvellement stocké par la prairie :

$$C_{\text{tot}} = C_f + C_p$$

$$C_{\text{tot}} \times A_{\text{tot}} = C_f \times A_f + C_p \times A_p$$

C_{tot} représente le stock de C total du sol. C_f représente le stock de C issu de la forêt et C_p celui la prairie. C_f et C_p sont les deux inconnues. A_{tot} est l'abondance isotopique du ^{13}C du sol de la prairie étudiée. A_f et A_p sont les abondances isotopiques du ^{13}C dans les racines de la forêt de référence et de la prairie étudiée (le carbone du sol principalement issu de l'humification des racines est caractérisé par son rapport isotopique). On parlera plutôt de C issu des plantes en C3 (qui peuvent être les arbres de la forêt ou des plantes adventices, noté C-C3) et de C issu des plantes en C4 (noté C-C4). La formule finale pour calculer les stocks est la suivante:

$$\text{Stock de C issu des plantes en C4} = C_{\text{tot}} \times \frac{(A_{\text{tot}} - A_{\text{C3}})}{(A_{\text{C4}} - A_{\text{C3}})}$$

2. RESULTATS

2.1. STOCK ET TENEURS EN C

2.1.1. Carbone du sol des sites de forêt témoin

Les forêts guyanaises étudiées présentent des teneurs en C assez variables comprises entre 17 et 62 g C/kg pour l'horizon 0-20, 7-31 pour l'horizon 20-50 et 3-13 pour l'horizon 50-100, qui dépendent notamment de la teneur en argile. Pour un profil donné, cette teneur en C diminue avec la profondeur (Feller *et al.*, 1991). Les stocks en C des sols forestiers varient en valeurs brutes de 72 à 148 t C/ha autour d'une moyenne de 100 t C/ha.

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

La dynamique de stockage de C du sol sous prairies après déforestation montre une augmentation depuis des valeurs brutes minimales de 52 t C/ha après mise en place, à des valeurs maximales de 203 t C/ha au-delà de 30 ans (figure 1). Neufs sites prairiaux montrent des stocks de C cumulés sur 1 m supérieurs à 100 t C/ha.

La reconstitution de la dynamique temporelle du C établie en stocks corrigés permet d'établir une comparaison dans le temps des différents sites de prairies. La tendance générale d'accumulation peut être scindée en 2 périodes. Durant les 2 premières décennies suivant la déforestation, on observe une légère diminution des stocks avec une forte variabilité en partie liée à des pratiques de mise en place des prairies (ex : parcelle Bu2005 fortement décapée versus Gi2007, cf. tableau 1). Après 30 ans, une nette augmentation est remarquable sous les parcelles les plus anciennes où les stocks de C atteints sont particulièrement élevés et supérieur aux forêts d'origine. Le modèle de régression explique 63 % de la variabilité des stocks (figure 1).

La comparaison des stocks de C corrigés (figure 2) montre une différence significative entre les prairies de plus de 20 ans par rapport aux prairies récentes et aux forêts témoins (moyennes respectives : 140.7, 90.4, 108.4 t C/ha).

2.2. DES DYNAMIQUES DU C LIEES A L'ORIGINE ET A LA REPARTITION DU C DANS LE SOL

2.2.1. Origine du carbone

Les proportions en C issu de la végétation de la forêt (C_f) et en C dérivé des graminées de la prairie (C_p) dans les sols des prairies montrent que le C forestier est progressivement remplacé par le C issu de la prairie au cours du temps. Le C du sol des prairies de moins de 20 ans est issu à 70 % en moyenne des plantes en C₃. Parallèlement, le C issu des plantes en C₄ augmente de façon assez régulière (de 25% en moyenne avant 20 ans à 40% après).

2.2.1. Les compartiments de la MO dans le sol

Le C des racines des prairies (0.9 à 2 t C/ha sur l'horizon 0-20 renfermant 70% des racines) reste toujours en faible proportion par rapport au C total du sol (2 à 6 %). En forêt, ce compartiment est plus important (3 à 7 t C/ha soit 4 à 12 % du C total du sol).

Le C des Matières Organiques Particulaires (MOP) issu de la prairie augmente surtout dans les premières années après la déforestation. Ce compartiment est de taille variable suivant l'âge et les prairies (3 à 11,7 t C/ha sur 1 m). Le C récalcitrant constitue le compartiment de stockage le plus important en prairie et en forêt (de 80 à 98% du C total du sol). Dans les prairies il est en constante augmentation au cours du temps (de 41 à 198 t C/ha).

3. DISCUSSION

Globalement, les prairies tropicales guyanaises fonctionnent comme des écosystèmes stockeurs de carbone. Le stock des sols des prairies de plus de 30 ans, dépasse celui des sols forestiers d'origine. Ces résultats sont cohérents avec les stocks de C sous forêt estimés dans des latosols (sols ferrallitiques) par Bernoux *et al.*, (1998) dans l'état de Rondônia au Brésil par des techniques géostatistiques (moyenne de 70 t C/ha).

Au-delà d'une quantification globale des stocks de C, chaque compartiment de la MO du sol a été caractérisé ainsi que la végétation aérienne (qui montre une forte homogénéité due à la forte dominance de la graminée *Brachiaria humidicola*).

L'écosystème prairial accumule peu de C et de nutriments dans la biomasse végétale contrairement à l'écosystème forestier (jusqu'à 225 t C/ha selon Rutishauser *et al.*, 2010). Cumulé avec le C du sol, la forêt amazonienne reste donc l'écosystème terrestre qui stocke le plus de C dans le monde (jusqu'à 400 tC/ha). Cependant ce C est majoritairement contenu dans le compartiment végétal aérien avec un recyclage rapide des nutriments qui réduit l'accumulation de ce C dans le compartiment souterrain. La prairie est au contraire un système basé sur un recyclage des matières organiques induisant un important stockage de C souterrain. Par ailleurs la majorité du C des sols étudiés est stocké sous forme récalcitrante stabilisée dans la MO que ce soit sous prairie ou sous forêt. Le compartiment racinaire (plus élevé en forêt) et celui des MOP (plus élevé en prairie) confirment cette différence de fonctionnement entre les deux écosystèmes et expliquent en partie les stocks élevés du C du sol sous prairies.

La dynamique d'accumulation du C du sol des prairies reconstituée dans notre étude est un processus long qui dépend de plusieurs facteurs tels que les caractéristiques des sols (texture, composition chimique) en lien avec la stabilité du C et de l'activité microbienne (Fontaine *et al.*, 2007). Leur étude pourrait conforter nos résultats. Malgré l'augmentation régulière du C issu des graminées fourragères, une partie importante des stocks en C sous prairies reste imputable à la forêt (ou aux plantes C₃ plus généralement) deux décennies après la déforestation. Les pratiques de déforestation (désouchage mécanique) sont également un facteur qui conditionne probablement la perte en C forestier du sol. Le C du sol séquestré par la prairie s'ajoute à celui hérité de la forêt et celui issu de la décomposition des souches et racines d'arbres encore présentes. Les impacts des pratiques de mise en place des prairies sur le stockage de C restent cependant à valider. Le C organique étant un des facteurs qui conditionne la fertilité des sols, une gestion des prairies favorisant le stockage net de C constitue un facteur de durabilité des terres déforestées qu'il serait également intéressant de confronter aux résultats présentés dans cette étude.

La chronoséquence mise en œuvre présente un intérêt méthodologique vis-à-vis des études existantes en se basant sur de nombreux sites de prairie indépendants et d'âges différents comparés à leur propre site de forêt «témoin». Elle intègre l'échelle globale des systèmes herbagers de Guyane au-delà de l'échelle plus localisée de l'exploitation (niveau d'approche le plus fréquent de ce type de recherches). L'isolement de systèmes ayant rigoureusement les mêmes caractéristiques mais des âges différents est quasiment impossible. De plus, de nombreuses variables co-varient et entraînent des difficultés d'interprétation. Pour pallier ces inconvénients, nous avons fait le choix de recourir à des valeurs standardisées permettant de comparer dans le temps les sites de notre échantillonnage en corrigeant la variabilité intrinsèque au milieu.

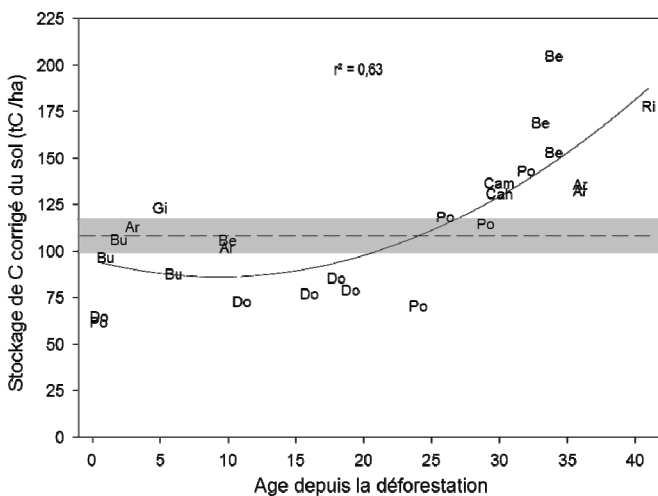
CONCLUSION

Au-delà de l'effet indiscutable de la déforestation et du changement du mode d'occupation des sols sur les pertes de carbone (et sur la biodiversité), nos recherches montrent que les pâturages issus de déforestation en Guyane ont un stock de C souterrain supérieur à celui des forêts d'origine 30 ans après leur mise en place. Une part des émissions de CO₂ induites par la déforestation peut donc être en partie compensée par une mise en place et une gestion adaptée des nouvelles formes d'utilisation des terres en pâturage en vue de favoriser le stockage de C. Dans un contexte amazonien où la durabilité de la fertilité des sols après déforestation (et donc des productions de fourrages) est très incertaine, la mise en relation des résultats de cette étude est une perspective intéressante en regard du modèle de fonctionnement des sols proposés par Fontaine *et al.*, (2007). Nos résultats constituent aussi une base de travail générique dans la prise en compte des stocks en C des sols pour la réalisation de bilan gaz à effet de serre des systèmes herbagers.

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

Nous remercions Stéphane Molinier, Frits Kwasié et Onoefé Ngwete pour leur appui technique. Cette étude est réalisée dans le cadre du projet CARPAGG (CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre, co-financé par les Fonds européens de développement régional (Feder PO 2007-2013) et le Cirad.

Figure 1 : Modèle de régression de l'évolution des stocks en C des sols des prairies sur 1 m de profondeur le long d'une chronoséquence composée de 25 prairies de 6 mois à 41 ans issues de déforestation. Moyenne des 6 sites de forêt témoins (tiret) et erreur standard en grisé.



Bernoux M., Arrouays D., Cerri C., De Alencastro Graça P.M., Volkoff B., & Trichet J., 1998. Estimation des stocks en C des sols du Rondônia (Amazonie Brésilienne). *Etude et Gestion des sols*, 5, 1.

Blanfort V., Doreau M., Huguenin J., Lazard J., Porphyre V., Soussana J.F S., & Toutain B., 2011. Impacts et services environnementaux de l'élevage en régions chaudes. N° spécial Elevage en régions chaudes, *INRA Prod. Anim.* 24(1),89-112

Boulet, R., Fritsch, E., & Humbel, F.-X. (1979). Les sols des terres hautes et de la plaine côtière ancienne en Guyane française septentrionale : organisation en systèmes et dynamique actuelle de l'eau. *ORSTOM*, Cayenne.

Cerri C.E.P., Coleman K., Jenkinson D.S., Bernoux M., Victoria R., & Cerri C.C., 2003. Modeling soil carbon from forest and pasture ecosystems of Amazon, Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, v. 67, p 1879-1887

Deleens, E., 1976: *La discrimination du 13C et les trois types de métabolisme des plantes.* *Phy- siol. Vég.* 14, 641-656.

Feller, C., Fritsch, E., Poss, R., & Valentin, C. 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XXVI, 25-36.

Fontaine S., Barot S., Barre P., Bdioui N., Mary B., & Rumpel C. (2007). Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, v. 450, p277-280.

De Moraes Sa J.F.L, Neill C., Volkoff B., Cerri C.C., Melillo J., Costa Lima V., & Steudler P.A. (2002). Soil carbon and nitrogen stocks following forest conversion to pasture in the Western Amazon Basin. *Acta Scientiarum*, v. 24, n. 5, p. 1369-1376

Neill C., Fry B., Mellilo J.M., Steudler P.A., Moraes J.F.L., & Cerri C.C, 1996. Forest- and pasture-derived carbon contributions to carbon stocks and microbial respiration of tropical pasture soils. *Oecologia*, v. 107, p113-119.

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

Figure 2 : Comparaison des stocks de C cumulés et corrigés. On observe une différence significative du stock de C entre prairies âgées et forêts témoins et prairies jeunes.

