

Interactions agriculture-environnement

Gaz à effet de serre et stockage du carbone par les sols : inventaire au niveau du Brésil

Martial Bernoux¹
Carlos C. Cerri²
Boris Volkoff¹
Maria da Conceição S. Carvalho³
Christian Feller¹
Carlos E.P. Cerri²
Vincent Eschenbrenner¹
Marisa de C. Piccolo²
Brigitte Feigl²

¹ Institut de recherche
pour le développement (IRD),
Unité de recherche (UR) 041-SeqC,
Laboratoire Most,
34394 Montpellier cedex 5,
France
<martial.bernoux@mpl.ird.fr>

² Centro de energia nuclear na agricultura /
Universidade de São Paulo (Cena-USP),
Biogeoquímica ambiental,
CP 96, 13400-970,
Piracicaba SP,
Brésil
<cerri@cena.usp.br>

³ Empresa Brasileira de Pesquisa
Agropecuária (Embrapa),
CP 714 74001-970,
Algodão,
Goiânia,
Brésil
<maria.santana@embrapa.br>

Résumé

L'un des défis majeurs de ce XXI^e siècle sera sans nul doute le réchauffement global et ses conséquences : ces changements climatiques dus à l'augmentation des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre. Le Brésil a ratifié la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques et doit donc fournir un inventaire annuel des gaz à effet de serre, qui doit comprendre les flux de CO₂ pour la catégorie 5D intitulée « Émissions ou séquestration de CO₂ par le sol dues au changement d'affectation des terres et à leur gestion ». Ces flux sont estimés à partir des changements des stocks de carbone au cours d'une période de 20 ans. Pour calculer ces flux, il est donc nécessaire d'établir les stocks de C dans les sols du Brésil. Ces travaux, menés en étroite coopération entre la France et le Brésil, ont permis l'obtention des premières estimations : le Brésil précolombien stockait 36 400 millions de tonnes dans les 30 premiers centimètres des sols du Brésil ; en 1995, ces stocks étaient réduits à 34 400 millions de tonnes. Entre 1990 et 2000, les pertes annuelles dues aux changements d'affectation des terres, à leur gestion et au chaulage totalisaient en moyenne 7,2 millions de tonnes de CO₂ par an.

Mots clés : climat ; ressources naturelles et environnement.

Abstract

Greenhouse gas fluxes and carbon storage from soil: The Brazilian inventory

Rising levels of atmospheric CO₂ have focused attention on potential CO₂ emissions from terrestrial ecosystems of the world, notably from soils and biomass. The world's mineral soils represent a large reservoir of C of about 1500 Pg C. Under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) each country is required to develop, update and publish a national inventories of anthropogenic emissions (implementation of the National Communications), as well as to compile the inventories by comparable methodologies. For the last point, guidelines were developed and published as IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Also, the land use, land-use changes and forestry (LULUCF) sector should be included in the national inventories. The CO₂ fluxes from soils are discussed in chapter 5 for agricultural soils under the category 5D: CO₂ emissions and removals from soils. These emissions are calculated from three subcategories : i) net changes in C storage in mineral soils; ii) emissions from organic soils; and iii) emissions from liming of agricultural soils. In a first step the soil organic carbon stocks up to a depth of 30 cm were estimated for Brazil based on a map of different soil-vegetation associations combined with results from a soil database. The soil-vegetation associations map was derived by intersecting soil and vegetation maps. The original soil and vegetation classification were reduced to 6 soil and 15 vegetation categories. Because this data represents sites with native vegetation in the absence of significant disturbances, it constitutes a valuable baseline for evaluating the effect of land-use change on soil C stocks for Brazil. Overall, about 36 400 million tons of carbon would be stored in the 0-30 cm soil layer under native conditions. The Brazilian Amazon region would account for 22,000 million tons. The CO₂ emission from mineral soils following land-cover change in Brazil for the period 1975-1995 was estimated by Bernoux *et al.* who showed that the annual fluxes for Brazil indicate a net emission of CO₂ to the atmosphere of 46.4 million tons of CO₂ for the period 1975-1995. Intermediary calculation used to derive these annual fluxes estimated that 34 400 million tons of carbon were stored in the Brazilian soil for the year 1995. The annual CO₂ emission for Brazil from liming varied from 4.9 to 9.4 million tons of CO₂ per year with a mean annual CO₂

Tirés à part : M. Bernoux

emission of about 7.2 million tons. The South, Southeast and Center region accounted for a least 92% of total emission. Finally it could be calculated that the total CO₂ fluxes from soils reached around 51.9 million tons of CO₂ per year for the period 1975-1995.

Key words: climate; natural resources and environment.

L'attention portée au réchauffement global et à l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère (principalement CO₂, CH₄, et N₂O) a conduit à s'interroger sur le rôle des sols en tant que source ou puits de carbone (C). Si l'on exclut les roches carbonatées, les sols constituent le plus grand compartiment superficiel de C, approximativement 1 500 Gt C, l'équivalent d'environ trois fois les stocks de la biomasse continentale et deux fois ceux de l'atmosphère. Le stock de C du sol étant fortement dépendant du mode d'usage des terres ou des pratiques culturales, une modification de ceux-ci peut conduire à des changements importants des stocks dans le sens d'une diminution ou d'une augmentation [1]. Ces variations, qui concernent essentiellement les horizons de surface (entre 0 et 30 cm de profondeur), sont dues, à l'échelle de la parcelle, à divers processus comme :

- les modifications du niveau et de la qualité des restitutions organiques [2] ;
- le transfert (dépôt, érosion, ruissellement, lixiviation) de matières organiques (MO) sous formes solide et soluble [3] ;
- les pertes par minéralisation (CO₂, CH₄) de la MO du sol [4].

Pour les sols tropicaux, l'ensemble de ces variations peut représenter parfois jusqu'à 50 % du stock initial des 20 premiers centimètres du sol [5]. Ainsi, par son mode de gestion des sols, l'homme peut espérer agir sur les flux de C entre les écosystèmes continentaux et l'atmosphère pour un meilleur contrôle des flux de GES.

Dans le cadre de ses obligations vis-à-vis de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC/UNFCCC, *encadré 1*), le Brésil, comme l'ensemble des parties signataires de cette convention, doit établir périodiquement une communication nationale suivant un canevas défini par la Conférence des parties. La communication nationale doit, entre autres, fournir l'inventaire annuel des gaz à effet de serre non réglementés par le protocole de Montréal. Pour faciliter les travaux et

assurer l'homogénéité des rapports issus de chaque pays, la CCNUCC invite toutes les parties à utiliser des méthodes comparables pour réaliser les inventaires. Pour ce faire, le Groupe international d'experts sur le climat (GIEC/IPCC) a élaboré des lignes directrices et des recommandations (*Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, [6]) sur les méthodes à suivre pour l'élaboration de ces inventaires. Ces recommandations sont divisées en 6 modules : énergie ; procédés industriels ; utilisation de solvants et d'autres produits ; agriculture ; utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCFC) ; et déchets. Chaque module est divisé en catégories. Le module 5, UTCFC (connu aussi sous l'acronyme anglais LULUCF pour *Land use, land use change and forestry*), comprend la catégorie intitulée « Émissions ou séquestration de CO₂ par le sol dues au changement d'affectation des terres et à leur gestion ». Cette catégorie correspond à la catégorie 5D du format officiel de restitution des inventaires (*Common reporting format*, CRF), exigé par la CCNUCC. Contrairement aux flux nets de N₂O et de CH₄ vers l'atmosphère, qui sont inventoriés directement pour le secteur agricole, les flux de CO₂ pour la catégorie 5D sont estimés à partir des changements des stocks de carbone en fonction du mode d'utilisation du sol et de leurs gestions.

La commission interministérielle brésilienne sur les changements climatiques globaux (Comissão interministerial de mudança global do clima) par le biais du ministère de la Science et Technologie a passé commande (mi-1999) au laboratoire de biogéochimie de l'environnement du Centro de energia nuclear na agricultura/Universidade de São Paulo (Cena-USP) d'un premier inventaire des stocks de carbone dans les sols du Brésil et des émissions de CO₂ de la catégorie 5D. Cette expertise a été menée en étroite collaboration entre les chercheurs de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et l'équipe du Professeur Cerri, du fait de la coopération existante

(voir *encadré 2*) et des thématiques étudiées.

Stocks de carbone dans les sols du Brésil

Les stocks de carbone des 30 premiers centimètres du sol ont été estimés à partir d'une carte des différentes associations sol-végétation [7]. Cette carte à l'échelle du cinq millionième a été obtenue par superposition de la carte simplifiée (6 catégories suivant les recommandations du GIEC) des sols avec celle de la végétation native (15 catégories). La carte des associations sol-végétation est faite de 21 111 polygones répartis en 75 catégories. Un stock de carbone représentatif de chaque association a été calculé à partir d'une base de données réunissant les informations de 10 457 horizons de sol correspondant à 3 969 profils de sol. Les stocks représentatifs varient de 1,5 à 41,8 kg C/m². Plus des trois quarts de la surface des associations sol-végétation ont un stock de carbone représentatif compris entre 3 et 6 kg C/m². Ces valeurs proviennent exclusivement de profils sous végétation naturelle : on peut donc considérer que le total est représentatif d'un « état initial » précolombien (*figure 1*). Au total, les sols brésiliens stockaient 36 400 ± 3 400 millions de tonnes de carbone dans les 30 premiers centimètres. L'Amazonie légale brésilienne stockait 22 700 millions de tonnes de carbone, soit environ 62 % du total.

L'exploitation de ces sols, notamment par la mise en culture ou l'installation de pâturages, a provoqué une diminution du stock qui est estimé à 34 400 millions de tonnes de carbone en 1995. Toutefois, il convient de constater que cette dernière estimation se situe dans la fourchette d'incertitude du stock initial, et doit donc être considérée avec précaution.

Encadré 1

Le protocole de Montréal a été élaboré pour lutter contre les atteintes à la couche d'ozone par les gaz fluoro-chlorés (fréons...). Ouvert à la signature en 1987, il a été ratifié et est entré en vigueur en 1989 (la signature d'un traité est l'acte par lequel un État manifeste son intérêt à l'égard du traité, mais cet État n'est pas lié par le traité au moment de la signature ; la ratification est l'acte par lequel un État exprime son consentement définitif à être juridiquement lié par le traité).

Pour prévenir les changements climatiques dus à l'accumulation des « gaz à effet de serre », la communauté internationale a élaboré la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC). Cette convention a été adoptée à New York le 9 mai 1992 et ouverte à la signature le 4 juin 1992, à Rio de Janeiro, lors de la conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement (*Sommet de la Terre*). Après avoir été ratifiée par 50 États, elle est entrée en vigueur le 21 mars 1994. Actuellement, 188 États l'ont ratifié, c'est-à-dire tous les États sauf quatre (Andorre, Brunei, Iraq, Somalie).

L'objectif ultime de la Convention « est de stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique » (Art. 2). Plusieurs principes généraux sont énoncés, dont le « **principe d'équité** » et le « **principe de précaution** ».

Principe d'équité : « Il incombe aux Parties de préserver le système climatique dans l'intérêt des générations présentes et futures, sur la base de l'équité et en fonction de leurs responsabilités communes mais différenciées et de leurs capacités respectives. Il appartient, en conséquence, aux pays développés d'être à l'avant-garde de la lutte contre les changements climatiques et leurs effets néfastes. »

Principe de précaution : « Quand il y a risque de perturbations graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour différer l'adoption de telles mesures. »

Trente-cinq pays développés sont désignés dans l'Annexe I de la convention. Il s'agit de pays développés du Nord, de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande ; 24 d'entre eux – les plus riches – constituent l'Annexe II de la convention (la Russie, la Biélorussie, l'Ukraine et les pays d'Europe de l'Est n'en font pas partie). Les autres pays (156) sont globalement désignés comme « non Annexe I ».

Après trois ans de négociations pour l'élaboration des règles d'application de la Convention, le protocole de Kyoto est adopté en 1997. L'objectif principal est de limiter quantitativement les émissions de gaz à effet de serre des pays de l'Annexe I. Pour cela, des quotas d'émissions sont attribués à chaque pays de l'Annexe I. Ces quotas figurent dans l'Annexe B du protocole. Ils sont fixés en référence aux émissions de 1990. Ces objectifs devront être atteints pendant la première période d'engagement (2008 à 2012). Globalement, compte tenu des quotas des différents pays de l'Annexe B, la réduction correspondrait, si le protocole entrait en vigueur, à des émissions, pendant la première période d'engagement, inférieures de 5,2 % à ce qu'elles étaient en 1990.

Pour que le protocole entre en vigueur, deux conditions doivent être remplies :

– ratification par 55 États.

– représentant 55 % des émissions des pays de l'Annexe B.

Actuellement, 128 États l'ont ratifié, la première condition est donc remplie. La deuxième condition vient d'être remplie le 18 novembre 2004, lorsque le représentant permanent de la Russie auprès des Nations unies a remis au secrétaire général les instruments de ratification. La Russie représente 17,4 % des émissions des pays de l'Annexe B, qui viennent se sommer au 44,2 % des émissions des autres pays de l'Annexe B qui l'avaient déjà ratifié. Cette ratification était devenue indispensable dans la mesure où les États-Unis (36,1 % des émissions des pays de l'Annexe B) ont décidé, le 28 mars 2001, de ne pas ratifier le protocole de Kyoto.

Le protocole de Kyoto entrera en vigueur 90 jours après la ratification russe, soit le 16 février 2005.

Encadré 2

Le laboratoire de biogéochimie de l'environnement (Cena-USP, Brésil), qui a pour champ thématique les relations entre la biochimie des sols et l'environnement, maintient une coopération scientifique avec l'Institut de recherche pour le développement (IRD, France) depuis plus de 20 ans officiellement *via* le Conselho nacional de desenvolvimento científico e tecnológico (CNPq) et de manière informelle depuis le début des années 1970. Cette collaboration fructueuse a permis la soutenance de 17 masters et 25 doctorats au Brésil, dont la première thèse en cotutelle entre une université française et l'université de São Paulo. Les recherches concernent le sol dans ses dimensions agronomiques, écologiques, géologiques et portent plus particulièrement sur la matière organique du sol. La matière organique est un facteur de la fertilité des sols, un indicateur de l'état de dégradation d'un milieu, un paramètre dans l'équilibre de l'environnement global.

L'objectif est la modélisation de la dynamique de la matière organique à différentes échelles d'espace et de temps, la mise au point d'outils prévisionnels permettant de mesurer l'effet des différentes formes d'intervention humaine sur la productivité des terres, l'environnement local et l'environnement global (les altérations climatiques).

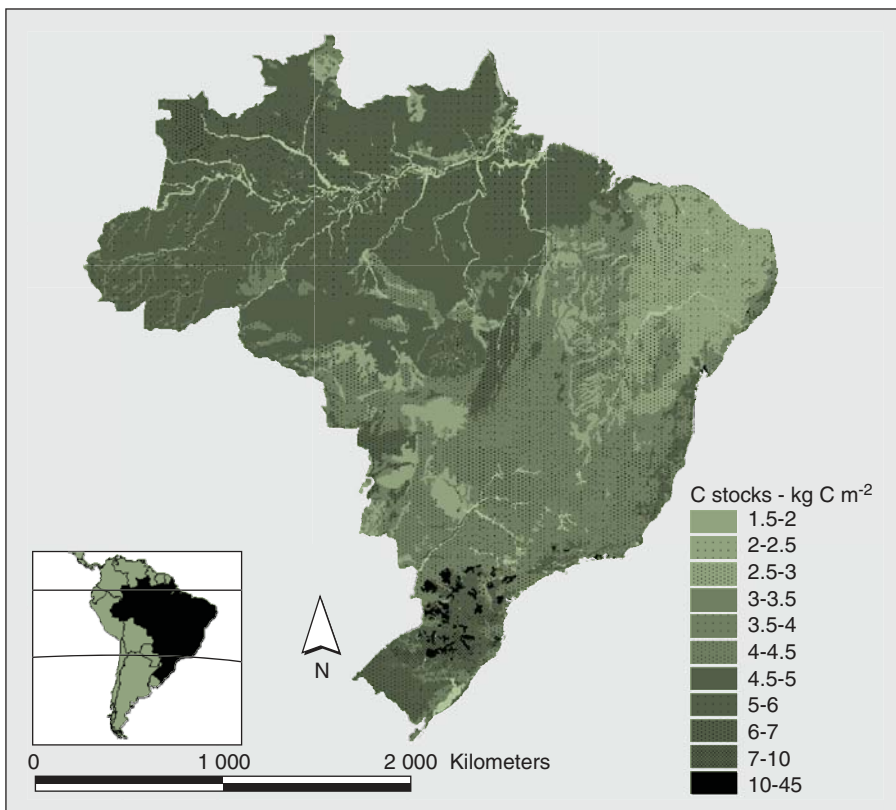


Figure 1. Stocks de carbone dans les sols (30 premiers centimètres) pour un Brésil qui serait entièrement sous végétation naturelle. Le stock total pour les 30 premiers centimètres de sol vaut 36 400 millions de tonnes de carbone (adapté de [7]).

Figure 1. Soil carbon stocks (first 30 centimeters) for Brazil that would be entirely under native vegetation. Total stock for the first 30 soil centimeters amounts to 36 400 million tons of carbon (adapted from [7]).

Émissions de CO₂ par le sol dues au changement d'affectation des terres et à leur gestion

Ces émissions ont été estimées [8, 9] selon la méthode préconisée par le GIEC [6]. Cependant, quelques modifications ont été apportées pour prendre en compte les spécificités brésiliennes et les données disponibles. Par exemple, le GIEC recommande une séparation des sols en 5 catégories : sol à haute activité (c'est-à-dire dont la capacité d'échange cationique est supérieure à $> 24 \text{ cmol}_c$ par kilo d'argile) ; sols à faible activité ; sols sableux ; sols volcaniques et sols maréca-

geux. Or, au Brésil les « sols à faible activité » dominent l'ensemble du territoire ; il a donc été jugé pertinent de distinguer au moins deux catégories : les Latossols et les « autres sols à faible activité ». De plus, les statistiques d'usages des terres sont disponibles selon un découpage territorial (villes, États...) mais non par type de sol. Une méthode intermédiaire, décrite par Bernoux *et al.* [8], a permis de contourner cet obstacle.

Finalement, il a été estimé que les changements d'affectation des terres et de leur gestion sont responsables d'une émission annuelle moyenne de CO₂ par les sols de 46,4 millions de tonnes de CO₂ (12,6 millions de tonnes de C), pour la période 1975-1995. Toutefois, il faut reconnaître que ces données ne sont que des estimations globales où interviennent des valeurs par défaut en l'absence de mesures disponibles. De nombreux travaux restent à mener pour évaluer avec plus de

précision les dynamiques des stocks de carbone pour les agroécosystèmes tropicaux.

À ces émissions, il convient d'ajouter les émissions liées au chaulage des sols [10]. Celles-ci ont varié entre 4,9 et 9,4 millions de tonnes de CO₂ par an entre 1990 et 2000, avec une moyenne située à 7,2 millions de tonnes de CO₂ par an. La moyenne est de 5,5 millions de tonnes de CO₂ par an entre 1975 et 1995. Il faut noter que les régions Sud, Sud-Est et Centre du Brésil participent pour plus de 90 % à ce total.

Autres GES émis/fixés par le sol

Le calcul des émissions nettes, pour les signataires de la CCNUCC, doit prendre en compte les émissions des autres GES, notamment, pour ce qui concerne le secteur agricole, le CH₄ et le N₂O. Le calcul de ces émissions nettes peut être exprimé en équivalents de CO₂, en prenant en compte le potentiel de réchauffement global (PRG) de chaque gaz. Les PRG sont les mesures relatives, pour une période de temps déterminée, de l'effet radiatif d'une substance donnée en prenant ici, comme référence, le CO₂ auquel on attribue une valeur de 1. Sur cette base, le troisième rapport d'évaluation du GIEC [11] donne pour les PRG, et pour un horizon séculaire (100 ans-PRG), des valeurs de 23 pour le CH₄ et de 296 pour le N₂O. Cela signifie que, en termes de forçage radiatif, un seul kg de CH₄ ou de N₂O est aussi efficace, respectivement, que 23 ou 296 kg de CO₂. Exprimés sur une base de quantités de C-CO₂ – aussi noté Ceq (pour C-équivalent), 1 kg de C-CH₄ équivaut à 8,36 kg Ceq, et 1 kg de N-N₂O à 126,86 kg Ceq.

Il n'y a pas encore d'estimation des flux de CH₄ et N₂O à l'échelle nationale du fait du manque de données. Toutefois, de nombreux travaux sont en cours pour essayer de répondre à ce besoin [12]. Des résultats [13] rapportent que des mesures effectuées en 1999-2000 pour des systèmes canniers avec récolte manuelle précédée d'un brûlis indiquent un puits de CH₄. Ce puits est quasi permanent tout au long de l'année, avec des valeurs comprises entre - 4,9 et - 48,8 g CH₄/ha/jour et avec une valeur moyenne de - 16,9 g CH₄/ha/jour. Cette valeur moyenne correspond à un puits annuel

de 6,17 kg CH₄/ha. Ces auteurs notent également que les changements de gestion (passage à une récolte sans brûlis et résidus laissés à même le sol) peuvent changer ce résultat et que les sols peuvent même devenir occasionnellement des sources de CH₄.

Conclusion

Ces travaux ont permis l'obtention des premières valeurs de référence concernant les stocks de carbone. Le Brésil précolombien stockait 36 400 millions de tonnes dans les 30 premiers centimètres des sols du Brésil ; en 1995, le stock total était réduit à 34 400 millions de tonnes. Entre 1975 et 1995, les pertes annuelles dues aux changements d'affectation des terres, à leur gestion et au chaulage totalisaient en moyenne 51,9 millions de tonnes de CO₂ par an.

Ces travaux, menés en étroite coopération entre la France et le Brésil, ont permis l'obtention d'estimations pour une catégorie (5D) qui est souvent non renseignée dans les communications nationales de nombreux pays (<http://unfccc.int/resource/natcom/index.html>). Les rapports qui serviront à l'élaboration de la première communication nationale du Brésil sont disponibles sur le site du ministère brésilien de la Science et Technique (MCT) : <http://www.mct.gov.br/clima>. ■

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un accord de coopération bilatérale entre la France et le Brésil (Projet CNPq-Cena-IRD). Les financements de ces recherches ont été assurés par la Fapesp (Fundação de amparo à pesquisa do Estado de São Paulo), le CNPq, le MCT, le MAE (ministère des Affaires étrangères), le Cena et l'IRD (Institut de recherche pour le développement).

Références

1. Arrouays D, Balesdent J, Germon JC, Jayet PA, Soussana JF, Stengel P. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective. Rapport INRA*. Paris : Institut national de la recherche agronomique (Inra), 2002 ; 332 p.
2. Jenkinson DS, Harkness DD, Vance ED, Adams DE, Harrison AF. Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the amount and radiocarbon content of soil organic matter. *Soil Biol Biochem* 1992 ; 24 : 295-308.
3. Chan KY. Soil particulate organic carbon under different land use and management. *Soil Use Manag* 2001 ; 17 : 217-21.
4. Schimel DS. Terrestrial ecosystem and the carbon cycle. *Glob Change Biol* 1995 ; 1 : 77-91.
5. Feller C, Beare MH. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 1997 ; 79 : 69-116.
6. Intergovernmental panel on climate change (IPCC), United Nations Environment Programme (Unep), Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), International energy agency (IEA). *Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Reporting instructions (vol. 1) ; workbook (vol. 2) ; reference manual (vol. 3)*. Intergovernmental panel on climate change, United Nations environment programme, Organization for economic co-operation and development, International energy agency. Paris : IPCC ; Unep ; OECD ; IEA, 1997. www.ipcc-nggip.iges.or.jp/pulic/gl/invs1.htm.
7. Bernoux M, Carvalho MCS, Volkoff B, Cerri CC. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Sci Soc Am J* 2002 ; 66 : 888-96.
8. Bernoux M, Carvalho MCS, Volkoff B, Cerri CC. CO₂ emission from mineral soils following land-cover change in Brazil. *Global Change Biol* 2001 ; 7 : 779-87.
9. Cerri CC, Bernoux M, Carvalho MCS, Volkoff B. *Emissões e remoções de dióxido de carbono pelos solos por mudanças de uso da terra e calagem. Relatórios de Referência do Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa*. Brasília : Ministério da Ciência e Tecnologia, 2001 ; 41 p.
10. Bernoux M, Volkoff B, Carvalho MCS, Cerri CC. CO₂ emissions from liming of agricultural soils in Brazil. *Glob Biogeochem Cycles* 2003 ; 17 : 1049-52.
11. Intergovernmental panel on climate change (IPCC). In : Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, et al., eds. *Climate change 2001 : the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge (UK) ; New York : Cambridge University Press, 2001 ; 881 p.
12. Scopel E, Douzet JM, Macena Da Silva FA, et al. Impacts des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la dynamique de l'eau, de l'azote minéral et du carbone du sol dans les *cerrados* brésiliens. *Cah Agric* 2005 ; 14 : 71-5.
13. Cerri CC, Bernoux M, Feller C, Campos D, De Luca E, Eschenbrenner V. Canne à sucre et environnement au niveau agricole. La canne à sucre au Brésil. *CR Acad Agric France* 2004 ; sous presse.