

## CANNE À SUCRE ET SEQUESTRATION DU CARBONE

### *SUGARCANE AND CARBON SEQUESTRATION*

par Carlos Clemente Cerri<sup>1</sup>, Martial Bernoux<sup>2</sup>, Christian Feller<sup>3</sup>, Dinailson Corrêa de Campos<sup>1</sup>,  
Edgar Fernando de Luca<sup>1</sup>, Vincent Eschenbrenner<sup>3</sup>.

#### Résumé

Plus d'un tiers des gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère est issu des activités agricoles. Pour contrer ou limiter ce phénomène, les sols cultivés ont un rôle important à jouer, car, selon leurs propriétés et leur mode de gestion, ils sont capables de stocker les gaz à effet de serre.

Au Brésil la culture de la canne à sucre couvre presque 5 millions d'hectares et majoritairement la récolte de la canne à sucre, pour diverses raisons, se fait après brûlis de la canne sur pied. Il y a donc une combustion quasi-complète des feuilles, avec pour conséquences une transformation du carbone végétal en CO<sub>2</sub> qui enrichit l'atmosphère, et des émissions probables de N<sub>2</sub>O (transformation d'une partie de l'azote végétal) et CH<sub>4</sub> gaz aux « potentiels de réchauffement global » élevés, environ 300 fois et 20 fois supérieurs respectivement à celui du CO<sub>2</sub>.

Une alternative à ce mode de gestion est le non-brûlis de la canne à sucre. Cette alternative deviendra juridiquement contraignante dans l'Etat de São Paulo. Les premiers résultats indiquent que l'adoption du « non-brûlis » s'accompagne dès les premières années d'un stockage accru du carbone dans le sol ainsi que d'une réduction des émissions totales de CH<sub>4</sub>.

De plus, éviter le brûlis présente d'autres avantages, parmi lesquels une augmentation de l'activité et de la biodiversité de la faune du sol, une limitation des pertes en nutriments et une diminution des risques d'érosion. Mais l'adoption du non-brûlis, qui implique de passer à une récolte mécanisée, peut poser cependant d'autres problèmes en termes socio-économiques.

#### **SUMMARY**

*More than one third of the greenhouse gases emitted to the atmosphere results from agricultural activities. To counter or mitigate this phenomenon, cultivated soils play an important role because, according to their properties and the way they are managed, they are able to store greenhouse gases.*

*In Brazil, Sugarcane fields cover almost 5 million hectares and the harvest nearly always involved burning of the field. There is thus an almost complete combustion of the leaves, and consequently transformation plant carbon into CO<sub>2</sub> and also emissions of N<sub>2</sub>O (transformation of part of plant*

---

<sup>1</sup> Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) Université de São Paulo (USP), Laboratoire de Biogéochimie Ambientale, Piracicaba, São Paulo, Brésil.

<sup>2</sup> IRD – Unité de Recherche “Séquestration du Carbone”- UR041, CENA-USP, Piracicaba, São Paulo, Brésil.

<sup>3</sup> IRD – Unité de Recherche “Séquestration du Carbone”- UR041, Montpellier, France

*nitrogen) and CH<sub>4</sub>. Those last two greenhouse gases present high global warming potential of approximately 300 times and 20 times that of CO<sub>2</sub>.*

*An alternative to this mode of management is the non-burning of the sugarcane before harvesting. This alternative will become juridically constraining in the São Paulo state. First results indicate that the adoption of the non burning is accompanied during the first years by an increasing soil carbon storage and decreasing CH<sub>4</sub> emissions. Moreover, adopting harvesting without burning has other positive effects onto the quantity and biodiversity of the soil macrofauna. Also it can be observed a limitation of the nutrient losses and a reduction in the erosion risks. But the adoption of the non-burning, which implies to adopt a mechanized harvest, can however have implications in socio-economic terms.*

### INTRODUCTION

Au début des années 1990, la société globale a pris conscience de l'importance potentielle que représente, pour le changement climatique, l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique dans l'atmosphère, et de la nécessité de diminuer ces concentrations. Parmi ces GES, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) contribue pour 55% à l'effet de serre, le méthane (CH<sub>4</sub>) pour 17% et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) pour 7%. Les activités agricoles et forestières sont responsables pour environ un tiers de cet effet et concernent ces trois GES (IPCC, 2001). Le secteur agricole est très important puisque ce pays est le premier exportateur mondial de soja et dérivés, de sucre, de pulpe d'orange et de poulet. Au Brésil, l'utilisation agricole des sols (le « secteur 5D » des inventaires nationaux), a été responsable d'une émission annuelle moyenne de 46,4 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> pour la période 1975-1995 (Bernoux et al., 2001). Parmi les alternatives de gestion susceptibles de favoriser le stockage de carbone d'origine atmosphérique dans le système sol-plante, le non-labour du sol et/ou les cultures sous couverture végétale sont mis en avant par de nombreux travaux. Toutefois, leurs potentialités doivent être testées en vraie grandeur et quantifiées. En ce qui concerne l'industrie du sucre le présent travail étudie l'effet du mode de gestion des résidus de la canne à sucre sur la séquestration de carbone dans un sol ferrallitique argileux du Brésil.

La canne à sucre occupe 5 millions d'hectares au Brésil, et sa production de biomasse foliaire est importante (10 à 15 t MS ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>). Dans le système de récolte traditionnel, notamment pour faciliter la coupe manuelle des cannes, les feuilles sont brûlées avant récolte et il n'y a donc pas de dépôt de résidus de culture sur le sol. Dans le système alternatif sans brûlis, qui implique généralement la mécanisation de la récolte, la biomasse foliaire est laissée en paillis sur le sol lors de la récolte. Si la majeure partie de ce paillis est minéralisée progressivement au cours de l'année, une partie est susceptible de résider plus longtemps dans le système, donnant lieu à une augmentation de la teneur en matière organique (MO) du sol.

Dans l'état de São Paulo, responsable pour plus de la moitié de la récolte brésilienne de canne à sucre, les sucreries et distilleries sont obligées par une législation récente (décret n° 10.547, du 2 mai 2000, complété par le décret n° 11.241, du 19 septembre 2002) d'adopter progressivement le non-brûlis. L'objectif de ce travail est de comparer en terme séquestration de carbone et de bilan de GES les alternatives de gestion avec brûlis (CB) et sans brûlis (CNB).

### Matériel et méthodes

#### *Site expérimental*

Cette étude a été réalisée dans plusieurs plantations de canne à sucre, toutes situées dans la région de Ribeirão Preto dans l'état de São Paulo. Le climat de la région est tropical (Aw selon la classification de Koppen) avec une température moyenne annuelle de 22,9°C et une pluviométrie

moyenne annuelle de 1560 mm concentrée l'été. Toutes les situations étudiées sont en culture continue de canne à sucre (*Saccharum officinarum* L., var. SP 80-185) depuis 50 ans.

Situation 1 : Les parcelles étudiées appartiennent à la sucrerie São Martinho située près de la ville de Pradópolis (21°22 Sud et 48°03 Ouest) à une altitude d'environ 620 m. Le sol est développé sur des coulées basaltiques. Sa texture est argileuse (60-65% d'argile), la fraction argileuse étant constituée principalement de kaolinite et d'oxyhydroxydes métalliques. Il est classé comme Latosol rouge dystrophique (EMBRAPA, 1999), Orthic Ferralsol (FAO, 1972) ou Typic Hapludox (Soil Survey Staff, 1999). En surface (0-10 cm), le pH CaCl<sub>2</sub> est de 4,7, la capacité d'échange cationique de 9 cmol(+) kg<sup>-1</sup> et le taux de saturation en bases du complexe d'échange d'environ 30%. Jusqu'en 1995, la récolte était effectuée après brûlis. A partir de 1995, le site a été divisé en 12 parcelles : six parcelles avec récolte manuelle précédée d'un brûlis deux à sept jours auparavant, comme durant les 50 années précédentes (traitement CB, canne brûlée) ; six parcelles avec récolte mécanisée et abandon des résidus végétaux non brûlés (feuilles et extrémités des tiges) en paillis à la surface du sol (traitement CNB, canne non brûlée). Chaque parcelle a été attribuée au hasard à l'un ou l'autre traitement. La plantation est fertilisée en NPK à 25, 125 et 125 kg ha<sup>-1</sup> à la plantation (tous les six ans), puis à 85, 50 et 100 kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> à chaque repousse, c'est-à-dire chaque année car le cycle cultural dure 12 mois. La variété de canne plantée est SP 80-185 avec une distance entre ligne de 1,50 m.

Situation 2 : Les parcelles étudiées appartiennent à la sucrerie Da Pedra située près de la ville de Serrana (21°12 Sud et 47°03 Ouest) à une altitude d'environ 620 m. la texture du sol est sableuse (10-15% d'argile). Il est classé comme Neossolo Quartzarênico (EMBRAPA, 1999), Arenosol (FAO, 1972) ou Quartzipsamment (Soil Survey Staff, 1999). La variété de canne plantée est RB 7851-48 avec une distance inter-rang de 1,50 m. L'essai étudié est organisé comme pour la Situation 1.

### ***Échantillonnage***

Litières : L'échantillonnage des litières a été réalisé à l'aide d'un gabarit métallique de 0,5 m x 0,75 m disposé de façon à prélever la paille sur la moitié de l'espace entre deux lignes plantée. Pour l'évolution de la décomposition intra annuelle des litières, les échantillons ont été prélevés à l'intérieur de la base circulaire (diamètre interne de 29 cm) du dispositif utilisé pour mesurer les flux de GES à l'interface sol-litière/atmosphère.

Sols : Des échantillons de sol ont été prélevés en mars 1999, à la fin de l'été pluvieux, une semaine avant la quatrième récolte. Sur chaque parcelle expérimentale, 6 mini-tranchées, dont trois réparties sur le rang central et trois sur l'inter-rang, ont été échantillonnées à 0-5, 5-10 et 10-20 cm de profondeur. Les échantillons sont séchés à l'air, tamisés à 2 mm, et des aliquotes sont broyées à 0,2 mm pour analyse de C et N. Les parcelles avec brûlis (CB) ou sans brûlis (CNB) n'ont pas été échantillonnées en 1995, mais on peut supposer que les sols sous CB n'ont pas évolué de 1995 à 1999, étant depuis 50 ans sous le même système de culture.

Gaz à effet de Serre : Les flux des gaz à effet de serre (CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O) ont été mesurés à l'interface sol-litière/atmosphère à l'aide de dispositif constitué d'une base circulaire de 29 cm de diamètre fixée au sol (et avec les litières maintenues en place) et d'un couvercle muni d'un orifice permettant la collecte de gaz à l'aide de seringue. Lors d'une campagne de mesure, 6 dispositifs sont placés dans chaque traitement (CB et CNB). Des prélèvements sont effectués avec des seringues de 20ml lors de la fermeture du couvercle et 5, 10 et 15 minutes après la fermeture, ce qui permet de suivre les changements de concentration des GES et d'en déduire les flux à l'interface sol-litière /

atmosphère. Les mesures sont réalisées 3 fois dans la journée à 7 h, 12 h et 17 h. Les seringues sont ensuite ramenées au laboratoire pour le dosage de N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> à l'aide d'un chromatographe (Shimadzu modèle CR501).

Macrofaune du sol : Les prélèvements de macrofaune ont été effectués selon la méthode des monolithes, conseillée par le recueil de méthodes du Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF, Anderson et Ingram, 1989). L'échantillonnage a été réalisé en mars 2000 à la fin de l'été pluvieux. Dans chaque traitement (Forêt de référence, CB et CNB), 6 monolithes de 625 cm<sup>2</sup> de superficie (25 × 25 cm) et 30 cm de profondeur ont été prélevés. Noter que la « Forêt » est en fait une forêt dégradée par passage des animaux et interventions humaines.

## Résultats et discussions

### *Stockage dans la litière*

Lors de la récolte avec brûlis (CB), aucune litière ne subsiste sur le champ. En revanche, lors de la récolte sans brûlis (CNB), les cannes sont séparées du reste qui est broyé grossièrement et laissé sur le champ. La production moyenne de litière lors de la récolte pour la période 1996-2000 a été de 13,9 t/ha pour la situation-1 et de 12,9 t/ha pour la situation-2.

Tableau 1. Rendement et dépôt annuel de litière lors de la récolte des cannes pour les deux situations étudiées (t/ha)<sup>1</sup>

Table 1. Yield output and annual deposition of litter during the harvesting of the two studied situations (t/ha)

Année	Situation-1 - CNB			Situation-2 - CNB		
	rendement	dépôt	%	rendement	dépôt	%
1996	104	15,7	15,1	132	10,5	8,0
1997	114	12,8	11,2	96	16,8	17,5
1998	99	11,3	11,4	68	11,4	16,8
1999	82	14,5	17,7	43	-	-
2000	78	15,2	19,5	-	-	-
Moyenne	95,4 ± 13,5	13,9 ± 1,6	15,0 ± 3,3	84,8 ± 33,1	12,9 ± 2,8	14,1 ± 4,3

<sup>1</sup> les rendements et dépôts ont été déterminés par la Copersucar (Rapport final du projet canne à sucre saison 1999/2000 RT n°961, 2000).

Campos (2003) lors d'un essai agronomique sur la situation-1 a étudié l'effet de différentes variétés de canne à sucre sur la production annuelle de la litière lors de la récolte. Pour cela, il a comparé la variété la plus utilisée au sein de la sucrerie (SP 80-1816) à trois autres variétés choisies selon leurs potentialités de production de litière : RB82-5335 (forte production), RB83-5486 (production moyenne) et RB85-5453 (faible production). Aucune différence significative n'a été observée pour les parcelles avec récolte sans brûlis qui supportaient ces variétés depuis 4 ans. La quantité de paille résiduelle après 3 ans (avant la 4<sup>ème</sup> récolte) a peu varié, de 6,5 tMS ha<sup>-1</sup> à 7,5 tMS ha<sup>-1</sup>, ce qui correspond à un stock de C de 2,3 à 2,7 t C ha<sup>-1</sup>.

Les stocks de litière résiduelle, juste avant la récolte dans la situation-1 sont reportés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Stocks de C et rapports C/N, avant récolte, dans les litières résiduelles après une année de décomposition.

## CANNE À SUCRE : L'EXEMPLE DU BRÉSIL

Table 2. Carbon stocks and C/N ratios, before the yield, of the residual liter after 1 year of decomposition.

Année	Situation-1 - CNB			% des entrées cumulées depuis 1996
	t MS ha <sup>-1</sup>	t C ha <sup>-1</sup>	C/N	
1998	5,97 ± 1,55	2,55	nd	20,9
1999	4,46 ± 0,70	1,61	51	11,2
2000	5,59 ± 2,36	2,36	nd	10,3

En ce qui concerne la Situation-2, un seul prélèvement a été effectué en 1999 avant la récolte. La litière résiduelle pesait 3,58 ± 0,39 t MS ha<sup>-1</sup> (soit environ 1,35 t C ha<sup>-1</sup> et avec un rapport C/N = 65) et représentait 12,5 % des entrées cumulées depuis 1996.

En se basant sur les quantités de litière déposées lors de la récolte (Tableau 1) et résiduelle avant récolte (Tableau 2), il est possible d'étudier la dynamique de la décomposition annuelle des litières et de calculer des vitesses moyennes de décomposition. L'hypothèse simple d'une décomposition de type exponentielle peut être faite : au cours d'une année, la quantité de litière pour une date donnée t, s'obtient selon la formule  $Q(t) = Q_0 e^{-kt}$ . Si dans un premier temps on considère que la vitesse de décomposition est la même pour toutes les années, les données disponibles permettent d'écrire les équations suivantes :

$$\text{Pour la récolte de 2000 : } 5,59 = 14,5 e^{-k} + 11,3 e^{-2k} + 12,8 e^{-3k} + 15,7 e^{-4k}$$

$$\text{Pour la récolte de 1999 : } 4,46 = 11,3 e^{-k} + 12,8 e^{-2k} + 15,7 e^{-3k}$$

$$\text{Pour la récolte de 1998 : } 5,97 = 12,8 e^{-k} + 15,7 e^{-2k}$$

Les solutions mathématiques respectives des équations sont  $k=1,23635 \text{ an}^{-1}$ ,  $k=1,2814 \text{ an}^{-1}$  et  $k=1,1039 \text{ an}^{-1}$ . Ces valeurs calculées pour k varient du fait des erreurs qui sont associées aux mesures des poids de litière, mais aussi de la variabilité spatiale de ces dépôts. La vitesse de décomposition dépend de l'activité biologique, qui dépend fortement des conditions de température et d'humidité. Ces conditions peuvent varier d'une année à l'autre. Pour cette première approche nous pouvons considérer un coefficient de décomposition moyen pondéré  $k_{\text{moy}}$  pour la période 1998-2000 de 1,222 an<sup>-1</sup> ou encore de 0,0034 jour<sup>-1</sup>. Ce coefficient de décomposition correspond à une demi-vie (demi-vie =  $\ln 2 / k$ ) moyenne de 0,567 an, soit 207 jours. En intégrant les équations moyennes annuelles de décomposition il est possible de calculer le stock moyen de litière (SML) présent sur le sol pour chaque année, la première année SML= 8 t MS et la 5<sup>ième</sup> année 11,3 t MS, avec une moyenne de 10,4 t MS (environ 4,5 t C) sur la période de 5 ans après la mise en place de la canne.

Des mesures ont également été effectuées au cours de l'année 1999/2000 entre deux récoltes successives (Figure 1). En simplifiant la modélisation de la décomposition, en la réduisant à une seule équation globale, on peut calculer un coefficient de décomposition de 0,0027 jour<sup>-1</sup> et une demi-vie moyenne de 257 jours environ pour la période concernée qui correspond à un SML d'environ 9 t MS.

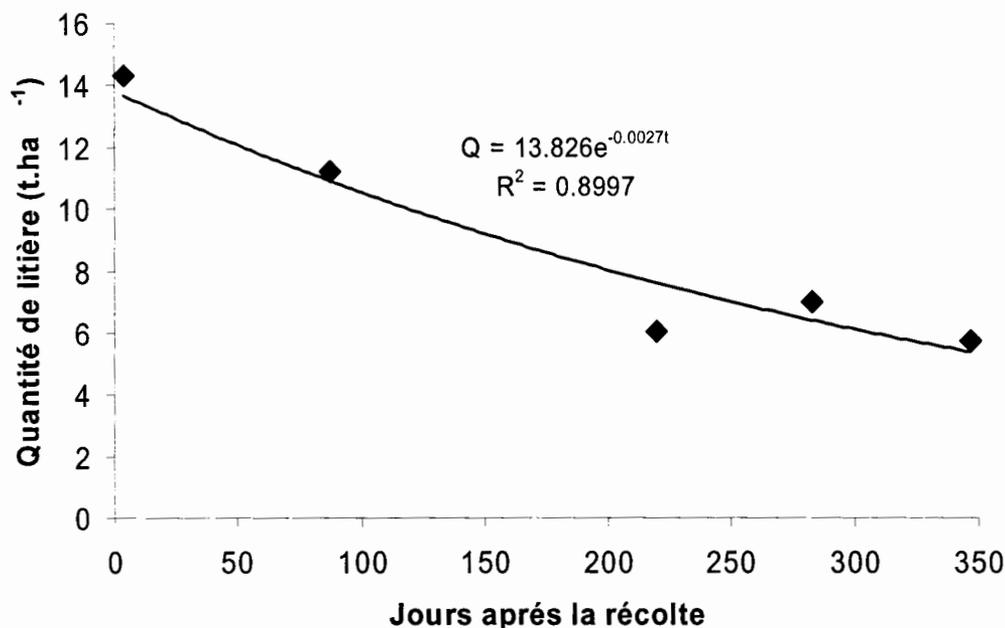


Figure 1. Variation de la quantité de litière au cours de la saison agricole 1999-2000 pour la situation-1 (CNB).

Figure 1. Variation of litter quantity during the season crop 1999-2000 for situation 1 (not burned sugarcane CNB)

Tous ces résultats montrent que, suite au non-brulis, il existe en permanence un stock important de C, de l'ordre quelques tonnes par hectare, sous forme de litière sur le sol. Toutefois ce compartiment est très labile et peut être réduit fortement, par exemple, lors d'un feu accidentel. Toutefois, on ne sait pas ce qui se passera lors de la « réforme » (replantation de la canne) du champ de canne qui intervient tous les 5-7 ans.

#### Stockage dans le sol

Les stocks de C dans le sol après 4 ans de culture avec les systèmes CB ou CNB pour la situation-1 et la situation-2 sont détaillés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Stocks de carbone pour les systèmes CB et CNB, et taux moyen de stockage correspondant pour les Situations 1 et 2.

Table 3. Carbon stocks under burned sugarcane (CB) and not burned sugarcane (CNB), and corresponding mean rate of storage, for Situation 1 and Situation 2

Profondeur cm	Stock de carbone (tC.ha <sup>-1</sup> )					
	Situation 1			Situation 2		
	CB	CNB	ΔC	CB	CNB	ΔC
0-5	11.72	14.87	3,15	4.84	7.68	2,84
5-10	12.43	14.41	1,98	5.35	5.92	0,57
10-20	24.80	26.17	1,37	10.80	12.26	1,46
0-10	24,15	29,28	5,13	10,19	13,60	3,41
0-20	48.95	55.45	6,50	20.99	25.86	4,87

## CANNE À SUCRE : L'EXEMPLE DU BRÉSIL

La quantité de résidus aériens accumulés et restitués dans la Situation 1 par les 3 précédentes récoltes est de 39,8 t MS ha<sup>-1</sup> soit environ 17 tC ha<sup>-1</sup>. Les différences de stocks de C entre CNB et CB ( $\Delta C$ ) ne sont significatives que pour la couche 0-5 cm. Le surplus  $\Delta C$  de C stocké en CNB dans la couche 0-20 cm représente ainsi 38% du C restitué sous forme de paillis. Environ la moitié se situe dans la couche 0-5 cm et l'augmentation de C représente 18,5% du C restitué sous forme de paillis. Cette valeur est supérieure au stock de C présent dans la litière résiduelle (1,61 tC ha<sup>-1</sup>) qui représente 9,5% du C restitué sous forme de paillis. Pour la Situation 2, sableuse, le surplus de C stocké en CNB dans le sol (0-20 cm) et le stock dans la litière résiduelle représentent respectivement 29,5% et 8,2% du C introduit dans le système par les restes de culture.

Dans la Situation 1, le système CNB stocke 6,5 t C de plus que le système CB pour la couche 0-20 cm, ce qui représente un taux de stockage de 1625 kg C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour les quatre premières années.

Il est intéressant de noter que pour le sol sableux de la Situation 2 l'accroissement ( $\Delta C = 4,87$  tC ha<sup>-1</sup>) est du même ordre de grandeur que pour le sol argileux, même si les stocks initiaux des sols sont fortement différents.

Razafimbelo et al. (2003) ont prélevé en août 2001 les sols (0-xx cm) de la Situation 1 lors d'une étude des agrégats et des fractions granulométriques de la matière organique. Leurs résultats montrent un  $\Delta C$  de seulement 3,9 tC ha<sup>-1</sup>, 6 ans après l'adoption du non brûlis. Cela confirme l'existence d'une variabilité spatiale importante qui perturbe l'observation des changements au cours du temps. Mais il faut aussi noter que ces auteurs ont utilisé une masse volumique moyenne de sol en l'absence de mesure de celle-ci, ce qui peut altérer les résultats.

D'autres résultats, pour la couche 0-20 cm, obtenus dans la même région du Brésil lors de l'étude de parcelles commerciales en CB et CNB, sont reportés par Feller (2001) et sont synthétisés dans le

Tableau 4. Taux annuels moyens de stockage pour la couche 0-20 cm observé pour des parcelles commerciales de canne à sucre dans la région de Ribeirão Preto, Brésil.

Table 4. Mean annual storage rates observed in the 0-20 cm soil layer in commercial sugarcane field of the Ribeirão Preto region, Brazil.

Localisation	Sol (classification Brésilienne)	Argile %	Stock CB	Stock CNB	Temps NB (ans)	Taux annuel tC ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>
Sucrerie São Martinho – Pradópolis (Etat de São Paulo)						
Parcelle A	Latossolo Vermelho dis.	70-80	42,11	43,61	3	0,50
Parcelle B	Latossolo Vermelho dis.	70-80	42,11	40,98	5	-0,23
Sucrerie Santa Luiza – Matão (Etat de São Paulo)						
Parcelle C	Argissolo Cromico	18-25	23,88	28,93	4	1,26
Parcelle D	Latossolo Vermelho Amarelo	32-36	40,01	43,91	12	0,33

Feller (2001) note que, lors de la mise en place des alternatives CB et CNB de la parcelle B, il y avait probablement des différences initiales qui masquent les résultats. Par ailleurs, en ce qui concerne la parcelle D, il y a eu une réforme avec travail du sol et probablement un enfouissement des résidus. De tous ces résultats on constate que pour des durées de 3-5 ans les augmentations de stocks de C du sol vont de 0,5 à 1,6 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, mais sont fortement diminués sur le moyen terme avec la prise en compte des réformes des champs de canne et/ou peut-être d'une tendance vers l'équilibre et l'atteinte d'un palier.

Très peu de résultats comparant les systèmes CB et CNB ont été publiés. Graham et al. (2002) ont étudiés en Afrique du Sud l'impact de la gestion des résidus (brûlés ou non, laissés en place ou retirés) et de la fertilisation sur la MOS dans un essai de très longue durée (59 ans). Le stock de C pour la couche 0-30 cm pour le système fertilisé sans brûlis est de  $137,7 \text{ t C ha}^{-1}$  et de  $132,6 \text{ t C ha}^{-1}$  pour le même système avec brûlis, sans toutefois que la différence soit significative. Par contre, pour la couche superficielle 0-10 cm les différences sont significatives (mais les résultats ne sont pas donnés dans l'article). Quoiqu'il en soit ces différences de stock se traduisent par un accroissement annuel très faible ne dépassant pas  $0,09 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . En Australie (climat tropical, PAM = 4300 mm, 15-20tMS de résidus par an) Noble et al. (2003) constatent une augmentation de  $4,8 \text{ t C ha}$  dans la couche 0-10 cm après 7 ans de gestion sans brûlis, soit un taux moyen de stockage de  $0,69 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Egalement en Australie, Thorburn et al. (2000) ont étudiés 5 situations différentes avec des alternatives CB et CNB âgées de 3 à 18 ans. Dans les 5 situations, les stocks de C pour CNB ne sont statistiquement supérieurs à CB que pour la couche 0-5 cm. Ces auteurs rapportent une augmentation maximale de la teneur de C de  $0,24 \%$  pour la couche 0-10 cm d'un sol argileux après 7 ans de culture sans brûlis. En prenant une densité arbitraire de  $1,2 \text{ g. cm}^{-3}$ , cette augmentation correspond à un taux d'accroissement annuel d'environ  $0,4 \text{ t C. ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ .

#### Flux de $\text{CH}_4$ au niveau du sol sur une année

Les flux de méthane peuvent être positifs (production par les sols) ou négatifs (consommation par les sols) en fonction des communautés bactériennes qui s'exprimeront en accord avec les conditions édaphiques. Les résultats des mesures effectuées pour les systèmes CB et CNB de la Situation 1 au cours de l'année agricole 1999/2000 sont synthétisés Figure 2.

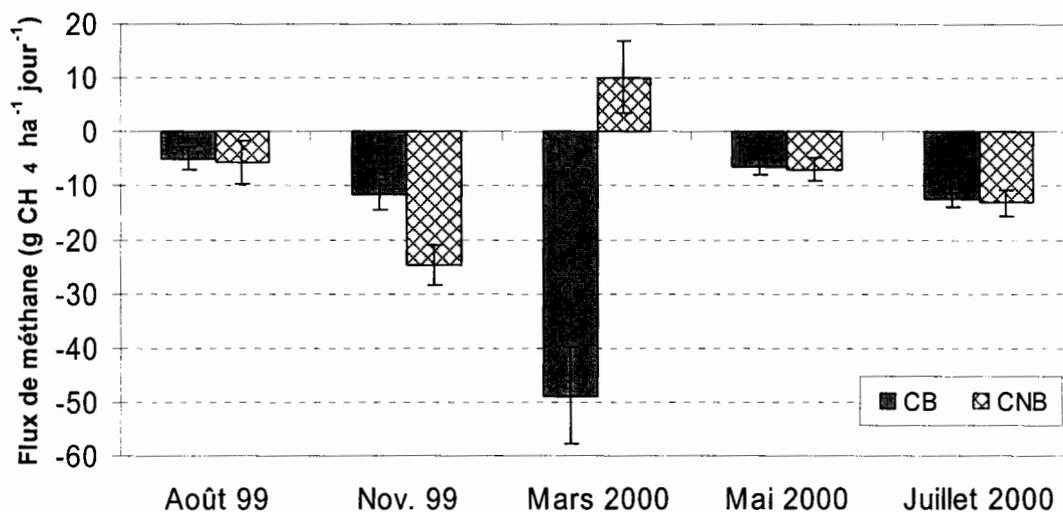


Figure 2. Flux de méthane mesurés dans le système CB et CNB. Les barres représentent les erreurs types (écart-type divisé par la racine du nombre d'observations).

Figure 2. methane fluxes for burned sugarcane (CB) and not burned sugarcane (CNB). Bars represent standard errors (standard deviation divided by the number of observation).

Le traitement avec brûlis (CB) présente un puits permanent de  $\text{CH}_4$  tout au long de l'année avec des valeurs comprises entre  $-4,9$  et  $-48,8 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$  et avec une valeur moyenne de  $-16,9 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ . Cette valeur moyenne correspond à un puits annuel de  $6,17 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  pour le système CB. Pour le traitement CNB, l'amplitude des variations est plus importante, avec des

mesures qui vont d'un puits de  $-24,6 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$  à une émission nette de  $10,1 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ . Toutefois la valeur moyenne reste un puits de  $8 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$  ce qui correspond à un total annuel de  $2,92 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ . Lors d'une mesure effectuée une semaine après la récolte d'août 2000 le système CB fonctionnait comme un puits de  $21,6 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$  alors que le système CNB émettait  $38,4 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ .

Schweizer (2000) a mesuré pendant 3 mois de l'été pluvieux (novembre à janvier) des flux de GES dans des plantations de canne à sucre situées à Piracicaba, 200 km au sud de la Situation 1. L'auteur calcule des puits moyens de  $-3,9 \text{ g}$ ,  $-0,1 \text{ g}$  et  $-1,1 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$  dans des champs récoltés avec brûlis depuis respectivement 28, 66 et 21 ans.

#### Flux de $\text{N}_2\text{O}$ au niveau du sol sur une année

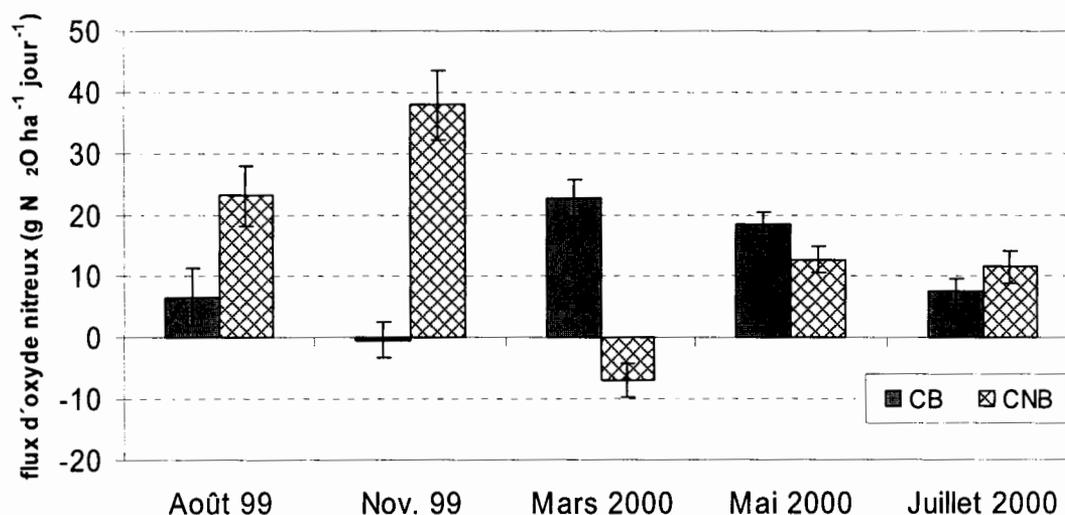


Figure 3. Flux de oxyde nitreux mesurés dans le système CB et CNB. Les barres représentent les erreurs types (écart-type divisé par la racine du nombre d'observations).

Figure 3. Nitrous oxide fluxes for burned sugarcane (CB) and not burned sugarcane (CNB). Bars represent standard errors (standard deviation divided by the number of observation).

Pour le système CB, les flux moyens varient de  $-0,3$  à  $22,6 \text{ g N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$  et présentent une valeur moyenne annuelle de  $11,0 \text{ g N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ . Dans le système CNB, les flux présentent des variations plus importantes avec des extrêmes de  $-6,8$  et  $23 \text{ g N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ , et une valeur annuelle moyenne de  $15,7 \text{ g N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ . L'existence de flux de  $\text{N}_2\text{O}$  négatifs est rares mais d'autres auteurs ont déjà observé ce phénomène (Bowden et al., 1991 ; Yamulki et al., 1995). Sur une année les systèmes CB et CNB émettent en moyenne  $4 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$  et  $5,7 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$  respectivement. Schweizer (2000) a également mesuré les flux de  $\text{N}_2\text{O}$  et donne des valeurs moyennes de  $7,3$ ,  $10$  et  $7,7 \text{ g N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$  dans des champs récoltés avec brûlis depuis respectivement 28, 66 et 21 ans. Peu de résultats ont été publiés concernant les flux de  $\text{N}_2\text{O}$  pour des systèmes CNB. Dalal et al. (2003) citent les travaux de Weier (2000) qui indiquent des valeurs moyennes d'émission de  $21 \text{ g N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$  dans un système CNB contre  $17,8 \text{ g N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$  pour CB.

Il apparaît nécessaire d'étudier plus en détail les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  dans les systèmes CB et CNB, principalement à certains moments critiques du cycle agricole : application de fertilisant, brûlis et réforme des plantations.

#### Flux de $\text{CH}_4$ et $\text{N}_2\text{O}$ lors du brûlis

Toute combustion de résidus organiques s'accompagne d'émissions de méthane et d'oxyde nitreux. Très peu de coefficients d'émission ont été mesurés, surtout pour ce qui concerne les oxydes nitreux, et rarement pour des résidus de canne à sucre. Pour l'établissement des bilans nationaux le GIEC (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997) propose l'utilisation des coefficients suivants : 0,005 kg de C-CH<sub>4</sub> libéré par kg de C libéré lors de la combustion et 0,007 kg N-N<sub>2</sub>O par kg de N libéré lors de la combustion. Nos résultats montrent une production moyenne de 13,9 t MS ha<sup>-1</sup> dans le système CNB. Si on considère que, dans le système CB, une quantité équivalente est consommée par le feu, cela équivaut à une libération par hectare d'environ 6 t C et 43 kg N (dans les résidus frais il y a en moyenne 430 g C et 3,1 g N par kg de MS), soit une libération de 30 kg C-CH<sub>4</sub> et 0,3 kg N-N<sub>2</sub>O, ou encore 35 kg CH<sub>4</sub> et 0,47 kg N<sub>2</sub>O. Mais ces valeurs peuvent varier fortement en fonction des conditions atmosphériques lors du brûlis (humidité de l'air, intensité du vent), et de l'état de la canne (teneur en eau et en azote). Le rapport C/N que nous avons mesuré est supérieur aux valeurs habituellement retenues. Lima et al. (2002), lors de l'élaboration du bilan des émissions de GES émis par le brûlis des résidus végétaux au Brésil, utilisent des teneurs moyennes en C et N de respectivement 42,5±2,1% et 1,27±0,5% pour les résidus de canne à sucre. L'utilisation de cette teneur en N impliquerait une émission de presque 2 kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. Dans une révision de la littérature, Andrae et Merlet (2001) proposent de nouveaux coefficients d'émission lors du brûlis des résidus d'origine agricole : 2,7 g CH<sub>4</sub> et 0,07 g N<sub>2</sub>O par kg de matière sèche brûlée. L'emploi de ces nouveaux coefficients permet de calculer une libération accrue de GES : 37,53 kg CH<sub>4</sub> et 0,97 kg N<sub>2</sub>O. Toutefois ces coefficients sont proposés pour tous les résidus agricoles (paille de maïs, résidus de coton,...) qui sont en règle générale fortement desséchés avant brûlis. Or, ces mêmes auteurs proposent lors du brûlis d'une savane ou d'une prairie des coefficients nettement plus élevés en ce qui concerne l'oxyde nitreux : 0,21±0,10 g N<sub>2</sub>O par kg de matière sèche brûlée. Les émissions de méthane, quelle que soit la méthode de calcul et les données utilisées, varient faiblement et se situent dans la fourchette 35-38 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>. Il n'en est pas de même pour les oxydes nitreux qui présentent des émissions qui varient très fortement avec des valeurs allant de 0,5-3 kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>.

Selon certains auteurs (par exemple Anderson et al., 1988 et Levine et al., 1988) le brûlis peut aussi induire une augmentation des émissions de N<sub>2</sub>O et NO<sub>x</sub> au niveau du sol. Mais ces résultats sont très isolés et incertains.

### Discussion et bilan complet

Le calcul des émissions nettes, pour les signataires de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (UNFCCC), doit être exprimé en équivalents de CO<sub>2</sub>, en prenant en compte le potentiel de réchauffement global (PRG) de chaque gaz. Les PRGs sont les mesures relatives, pour une période de temps déterminée, de l'effet radiatif d'une substance donnée en prenant ici, comme référence, le CO<sub>2</sub> auquel on attribue une valeur de 1. Sur cette base, le Troisième Rapport d'Evaluation du GIEC (IPCC, 2001) donne pour les PRGs, et pour un horizon séculaire (100ans-PRG), des valeurs de 23 pour le CH<sub>4</sub> et de 296 pour le N<sub>2</sub>O. Ceci signifie que, en terme de forçage radiatif, un seul kg de CH<sub>4</sub> ou de N<sub>2</sub>O est aussi efficace, respectivement, que 23 ou 296 kg de CO<sub>2</sub>. Exprimés sur une base de quantités de C-CO<sub>2</sub> - aussi noté C<sub>eq</sub> (pour C équivalent), 1 kg de C-CH<sub>4</sub> équivaut à 8,36 kg de C<sub>eq</sub>, et 1kg de N-N<sub>2</sub>O à 126,86 kg C<sub>eq</sub>.

A partir des quatre points traités précédemment il est alors possible d'établir une comparaison des systèmes CB et CNB sur la période de 4 ans étudiée.

*Tableau 5. Bilan annuel moyen pour 1 hectare de la Situation 1 en kg C<sub>eq</sub> (valeur négative indique un puits de C<sub>eq</sub> par rapport à l'atmosphère)*

**CANNE À SUCRE : L'EXEMPLE DU BRÉSIL**

Table 5. Mean annual balance for 1 hectare of Situation 1 in kg Ceq (negative value indicate a Ceq sink)

Origine	CB	CNB	$\Delta$ (CNB-CB)	Niveau d'incertitude
			annuel	
			kg Ceq ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>	
Stockage dans le sol 0-20 cm			-1625	*
Stockage dans la litière			Stockage provisoire	*
Flux annuel de CH <sub>4</sub>	-39	-18	21	**
Flux annuel de N <sub>2</sub> O	323	460	137	***
Flux de CH <sub>4</sub> lors du brûlis	230 <sup>a</sup>	-	-230	**
Flux de N <sub>2</sub> O lors du brûlis	140 <sup>b</sup>	-	-140	****
<b>Total</b>			<b>-1837</b>	

<sup>a</sup> valeur centrale de l'amplitude de variation 220-240 kg Ceq ; <sup>b</sup> valeur centrale de l'amplitude de variation 40-240 kg Ceq.

Ces résultats montrent clairement que d'un point de vue bilan GES, le système CNB est plus avantageux par rapport au système CB avec un gain net de -1837 kg Ceq par an pour la période concernée. Toutefois il convient de modérer les résultats obtenus par la stabilité des compartiments concernés. Le C stocké dans la litière ne peut être pris en compte dans ce bilan, car ce compartiment est très labile. Le stockage dans la litière, à cause de la demi-vie observée de 200-260 jours, intervient surtout les deux premières années de la mise en place du système. Les années suivantes, grosso modo, il y a quasi stabilisation du niveau de C stocké dans la litière puisqu'il y a quasi équilibre entre les entrées annuelles et les sorties. Ce compartiment intervient comme un réservoir transitoire qui va rapidement s'épuiser si les entrées diminuent. Par contre, la présence de ce compartiment est très importante puisque c'est la source de stockage de C dans le sol sous une forme plus stable.

De plus, ce bilan ne prend pas en compte la réforme du champ de canne qui intervient entre 5-7 ans quand les rendements diminuent. Lors de la réforme il y a souvent un travail du sol qui perturbe les litières mais aussi les couches superficielles. Ce point précis du cycle doit être étudié plus en détail.

D'autres effets sont induits par la suppression du brûlis. Par exemple, la macrofaune du sol (quantité et diversité) est fortement altérée par le non brûlis. Les résultats obtenus dans la Situation 1 montrent que plus de 50 ans de monoculture de canne à sucre gérée avec brûlis avant récolte s'accompagne d'une chute importante du nombre d'individus à l'hectare, mais aussi de la diversité. Ainsi, dans la situation CB, près de 75% des individus (et plus de 95% de la masse totale) sont des larves de coléoptères et, qui plus est, s souvent parasites de la canne. Il suffit de 4 ans pour que le nombre d'individus augmente et dépasse même celui rencontré sous forêt. Ce sont surtout les vers et les fourmis qui bénéficient de cette augmentation. Notons toutefois que la forêt qui sert de référence est une relique fortement perturbée de la forêt initiale (absence des grands arbres commerciaux par exemple). Razafimbelo et al. (2003) notent que la macrofaune et notamment les vers de terre, dont la biomasse est plus élevée sous paillis de résidus de canne, pourraient avoir un rôle important dans l'enrichissement de la fraction argileuse en C et dans l'amélioration de la stabilité structurale.

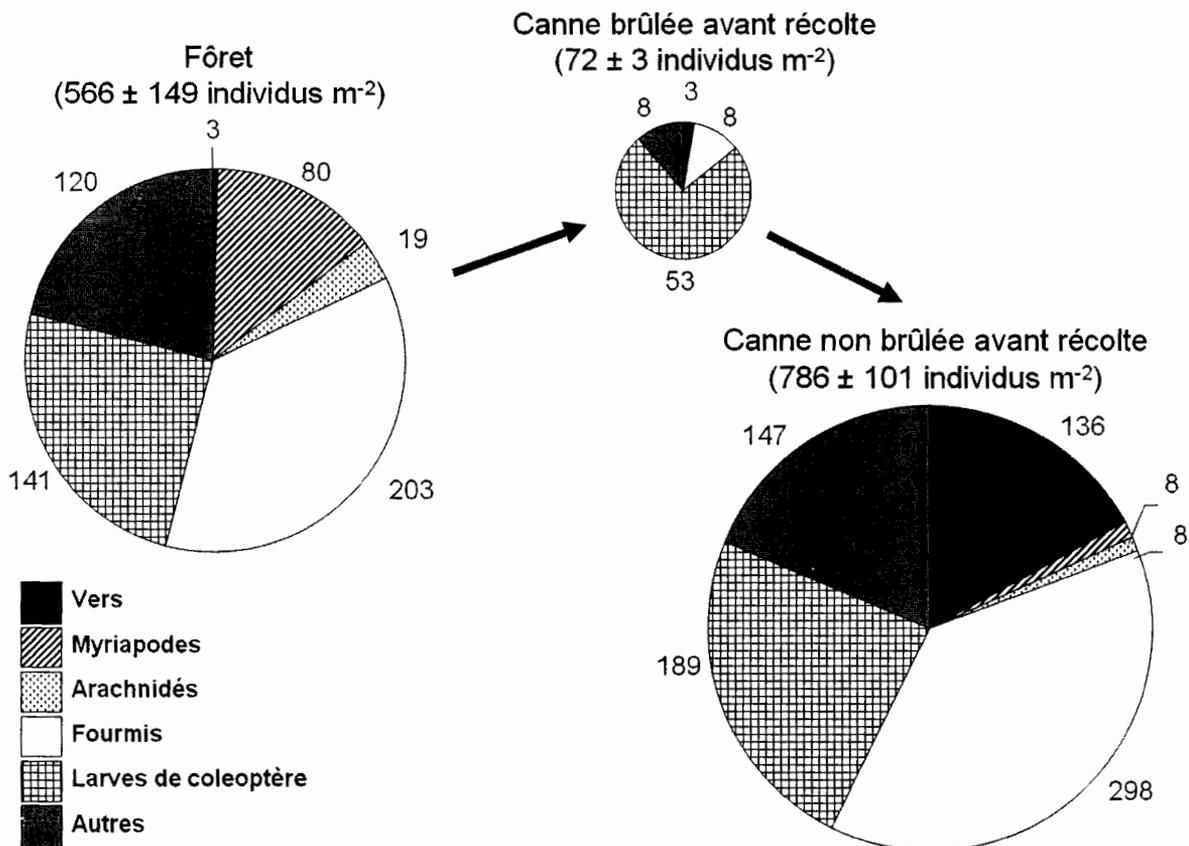


Figure 4. Nombre d'individus dans la couche 0-30 cm de sol sous forêt, canne à sucre récoltée avec brûlis depuis plus de 50 ans et après 4 ans d'adoption du non brûlis.

Figure 4. Individual Number in the soil layer 0-30 cm under forest, sugarcane burned before the yield for more than 50 years and after 4 years adopting no-burning yield.

Parmi les autres effets positifs il y a la présence d'une litière permanente qui apporte également le bénéfice d'une protection contre l'érosion et augmente les apports de nutriment au sol (Canellas et al., 2003).

En ce qui concerne les aspects sociaux, l'adoption du non brûlis est généralement perçue comme un progrès pour la santé humaine. Le brûlis des champs de canne à sucre provoque la libération de différents gaz et composés organiques potentiellement dangereux comme les hydrocarbures polycycliques aromatiques (Moreira dos Santos et al., 2002), ainsi que de l'émission de très abondantes cendres carbonées. Récemment, plusieurs études médicales (Arbex, 2001 ; Cançado, 2003 ; Roseiro, 2002) montrent une liaison entre la pratique du brûlis de la canne à sucre et l'augmentation des problèmes respiratoires, notamment chez les enfants. Même si l'impact négatif des fuligènes (cendres) sur les problèmes respiratoires est très controversé, il faut reconnaître que leur présence force les populations à nettoyer plus souvent leurs demeures et piscines, avec une forte consommation d'eau (encore bon marché au Brésil) à un moment où le niveau des cours d'eau est le plus bas.

Parmi les effets négatifs induits, l'impact sur le marché du travail est souvent cité, en particulier en ce qui concerne la main d'œuvre journalière. Il est vrai que l'adoption du non brûlis va de pair avec une récolte mécanisée. Une étude récente (Vieira, 2003) menée dans la plus grosse sucrerie – distillerie au monde (« Usina da Barra », responsable pour environ 4% du sucre et 3% de l'alcool produits au Brésil) dans l'état de São Paulo montre que, par heure opérationnelle, une récolteuse de canne remplace 67 coupeurs manuels. De plus, à terme, l'adoption du non brûlis

entraînera la perte de 2117 emplois de travailleurs manuels mais produira 177 emplois qualifiés. Cette perte nette d'emplois est souvent pointée du doigt comme le principal effet négatif de l'adoption du non brûlis. D'un autre côté ces emplois sont souvent critiqués et considérés comme à la limite du travail esclave.

### CONCLUSION

La récolte de la canne à sucre sans brûlis et avec dépôt d'un paillis des résidus restituée au sol une grande partie des matières organiques perdues lors d'une récolte après brûlis. La comparaison entre les deux modes de gestion CNB et CB montre que le paillis permet de séquestrer du C dans le sol étudié. De plus la prise en compte des flux d'oxyde nitreux et de méthane lors du brûlis et au long d'un cycle agricole complet accentue l'aspect positif de ce bilan en terme de mitigation des GES. L'adoption du non-brûlis présente d'autres aspects positifs importants sur la santé et l'environnement. L'adoption de cette pratique pourrait être accélérée par une reconnaissance de la fonction puits de carbone des sols tropicaux. Certains fonds privés d'investissement, tel le fond « biocarbone » de la banque mondiale, proposent d'ailleurs de financer des projets du type Mécanisme de Développement Propre et qui ne sont pas éligibles par le bureau des MDL de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques.

### Remerciements

Nous remercions les sucreries qui nous ont autorisé à travailler dans leur champ, ainsi que la Copersucar pour son appui technique et la mise à disposition de leurs essais agronomiques. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un accord de coopération bilatérale entre la France et le Brésil (Projet CNPq-CENA-IRD). Le financement de ces recherches a été assuré par la Fapesp, le CENA et l'IRD.

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Anderson J.M., Ingram J.S.I. 1989. Tropical Soil Biology and Fertility : A handbook of methods. Wallingford: CAB International, Cap. 2.5, pp.16-18. Soil fauna.
2. Anderson, I.C., Levine J.S., Poth M.A., Riggan P.J.. 1988. Enhanced Biogenic Emissions of Nitric Oxide and Nitrous Oxide Following Surface Biomass Burning. *Journal of Geophysical Research* 93: 3893-3898.
3. Andreae M.O., Merlet P. 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 4, 955-966.
4. Arbex M.A. 2001. Avaliação dos efeitos do material particulado proveniente da queima da plantação de cana-de-açúcar sobre a morbidade respiratória na população de Araraquara – SP. Thèse de la Faculté de Médecine de l'Université de São Paulo, São Paulo, Brésil. 188pp.
5. Bernoux M., Carvalho M.C.S, Volkoff B., Cerri C.C. 2001. CO<sub>2</sub> emission from mineral soils following land-cover change in Brazil. *Global Change Biology*, 7, 779-787.
6. Bowden R.D., Melillo J.M., Steudler P.A. 1991. Effects of nitrogen additions on annual nitrous oxides fluxes from temperate Forest soils in the northeastern United States. *J. Geophys. Res.*, 96, 9321-9328.
7. Campos D.C. de. 2003. Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o seqüestro de carbono. Thèse de l'École Supérieure d'Agriculture "Luiz de Queiroz", Université de São Paulo, Piracicaba, Brésil. 103 pp.

8. Cançado J.E.D. 2003. A poluição atmosférica e sua relação com a saúde humana na região canavieira de Piracicaba, SP. Thèse de la Faculte de Médecine de l'Université de São Paulo, São Paulo, Brésil. 201pp.
9. Canellas L.P., Velloso A.C.X., Marciano C.R., Ramalho J.F.G.P., Rumjanek V.M., Rezende C.E., Santos G.A. 2003. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 935-944.
10. Dalal R.C. Wang W., Robertson G.P., Parton W.J. 2003. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Australian Journal of Soil Research*. 41, 165-195.
11. Feller C. 2001. Efeitos da Colheita sem queima da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do carbono e propriedades do solo. Rapport final du Projet FAPESP 98/12648-3, Piracicaba, Brésil. 146pp.
12. Graham M. H., Haynes R. J., Meyer J. H. 2002. Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 93-102.
13. IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
14. IPCC/UNEP/OECD/IEA. 1997. *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reporting Instructions (Volume 1); Workbook (Volume 2); Reference Manual (Volume 3)*. Paris: Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Programme, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency.
15. Levine, J.S., Cofer W.R., Sebacher D.I., Winstead E.L., Sebacher S., Boston P.J. 1988. The Effects of Fire on Biogenic Soil Emissions of Nitric Oxide and Nitrous Oxide. *Global Biochemical Cycles* 2: 445-449.
16. Lima M.A., Ligo M.A.V., Cabral O.M.R., Boeira R.C., Neves M.C., Pessoa M.C.P.Y. 2002. Emissões de gases de efeito estufa na queima de resíduos agrícolas. *Relatórios de Referência, Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa*. Ministério da Ciência e tecnologia, Embrapa. 82 pp.
17. Moreira dos Santos C.Y., Azevedo D.A., Aquino Neto F.R. 2002. Selected organic compounds from biomass burning found in the atmospheric particulate matter over sugarcane plantations áreas. *Atmospheric Environment*, 36, 3009-3019.
18. Noble A. D., Moody P., Berthelsen S. 2003. Influence of changed management of sugarcane on some soil chemical properties in the humid wet tropics of north Queensland. *Australian Journal of Soil Research*, 41, 1133-1144.
19. Razafimbelo T. Barthès B., De Luca E.F., Larré-Larrouy M.C., Laurent J.Y., Cerri C.C., Feller C. 2003. Effet du paillis des résidus de canne à sucre sur la séquestration de carbone dans un sol ferrallitique argileux du Brésil. *Etude et Gestion des Sols*, 10, 191-200.
20. Roseiro M.N.V. 2002. Morbidade por problemas respiratórios em Ribeirão Preto-SP, de 1995 a 2001, segundo indicadores ambientais, sociais e econômicos. Master de l'Université de São Paulo, Ribeirão Preto, Brésil. 170pp.
21. Schweizer M. 2000. Variability of Factors Affecting Greenhouse Gas Fluxes (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub>) on a Dark Red Latossol Cultivated with Sugarcane (Brazil, São Paulo State). *Memore de l'ETH, Suisse*. 37p + annexes.
22. Thorburn P.J., Keating B.A., Robertson F.A., Wood A.W. Long-term changes in soil carbon and nitrogen under trash blanketing. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.*, 22, 217-224.

23. Vieira G. 2003. Avaliação do custo, produtividade e geração de emprego no corte de cana-de-açúcar, manual e mecanizado, com e sem queima prévia. Master de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'UNESP, Botucatu, Brésil. 115 pp.
24. Weier K.L. 2000. Trace gas emissions from a trash blanketed sugarcane field in tropical Australia. In Sugar 2000 Symposium: Sugar: research towards efficient and sustainable production (eds Wilson JR, Hogarth DM, Campbell JA, Garside AL), pp. 271-272. CSIRO Division of Tropical Crops and Pastures, Brisbane.
25. Yamulki S., Goulding K.W.T., Webster C.P., Harrison R.M. 1995. Studies on NO and N<sub>2</sub>O fluxes from a wheat field. *Atmospheric Environment*, 29, 14, 1627-1635.